

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
SEDE DI CESENA  
SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA  
CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN  
INGEGNERIA  
ELETTRONICA E DELLE TELECOMUNICAZIONI**

**Studio di modelli statistici di scattering  
da pareti di edifici**

Tesi in

PROPAGAZIONE E PIANIFICAZIONE NEI SISTEMI D'AREA LS

Relatore

**Prof. Ing. VITTORIO DEGLI ESPOSTI**

Presentata da

**ROBERTO FAEDI**

Correlatore

**Ing. ENRICO MARIA VITUCCI**

Seconda Sessione

Anno Accademico 2011 / 2012







# Indice generale

1	Introduzione .....	7
1.1	Significato dello scattering diffuso nella propagazione delle onde elettromagnetiche in ambiente urbano.....	7
1.2	Modelli (statistici) di scattering.....	8
1.3	Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering come processo aleatorio.....	12
1.4	Simulazioni.....	14
2	Modelli statistici di scattering da pareti di edifici.....	15
2.1	Significato dello scattering nella propagazione urbana e modelli analitici di previsione.....	15
2.2	Scattering speculare e non speculare da facciate di edifici (H. Bertoni).....	16
2.3	Un approccio per includere scattering stocastico da superfici rugose in modelli deterministici di propagazione a raggio delle onde radio (W. Wiesbeck).....	25
2.4	Modellazione della dispersione angolare dovuta allo scattering da superfici rugose per implementare strumenti di stima della propagazione fondati sul Ray-Tracing (M. Herben).....	30
2.5	Un modello a rugosità efficace per lo scattering distribuito "forward" e "backward" da pareti di edifici (V. Degli Esposti).....	37
2.6	Altri modelli di riflessione. Differenza tra l'approccio basato sull'Ottica Geometrica e l'approccio basato sull'Ottica Fisica.....	48
3	Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio. ....	57
3.1	Elementi di Ottica di Fourier.....	57
3.2	Power-angle profile di scattering e funzione di autocorrelazione.....	62
3.3	Schema di formalizzazione dello scattering quale processo aleatorio (modello a rugosità efficace).....	64
4	Simulazioni e conclusioni.....	67
4.1	Simulazioni.....	67
4.2	Conclusioni.....	76
	Bibliografia.....	79



## 1 Introduzione

### 1.1 Significato dello scattering diffuso nella propagazione delle onde elettromagnetiche in ambiente urbano

Nel caso di superfici lisce, piatte ed omogenee, la propagazione del campo può essere studiata facendo ricorso alle leggi dell'Ottica Geometrica e, di conseguenza, esclusivamente in termini di riflessione speculare, rifrazione, diffrazione.

Nel momento in cui si vuole studiare la propagazione in uno scenario urbano è poco ragionevole ipotizzare la presenza di sole superfici regolari, lisce, omogenee e si deve prendere in considerazione un fenomeno aggiuntivo, al di là dell'Ottica Geometrica, chiamato Scattering Diffuso.

La diffusione o scattering si riferisce alla proprietà di una superficie (tipicamente una parete di edificio) non omogenea di diffondere in ogni direzione e, quindi, non solo in direzione speculare, la potenza associata ad un'onda incidente. Se da una parte si verifica una diminuzione dell'intensità dell'onda riflessa, dall'altra la potenza incidente viene diffusa in tutte le direzioni.

Quando un'onda elettromagnetica incide su una parete di edificio dotata di rugosità superficiale o, si può anche dire, un insieme di ostacoli posizionati in modo casuale, la chiave di interpretazione del fenomeno propagativo non può prescindere dallo scattering diffuso.

Anzi, a ben guardare, lo scattering può venire correttamente formalizzato quale fenomeno globale, da interpretare tramite un approccio statistico in modo tale da riassumere i fenomeni di riflessione, diffrazione e rifrazione in tutti quei casi in cui non è possibile considerare superfici idealmente lisce ed omogenee.

In effetti, un aspetto fondamentale da sottolineare è l'impossibilità di costruire ed usare informazioni molto dettagliate sul profilo esatto della superficie su cui incide l'onda elettromagnetica. Di certo si pone il problema della complessità degli ostacoli (pareti di edifici con rugosità superficiale, balconi, colonne) dislocati lungo il percorso dell'onda incidente. Tra l'altro si può parlare di irregolarità di superficie ma anche di irregolari-

## 1 Introduzione

tà di volume, vale a dire disomogeneità nei materiali ed elementi interni alle pareti stesse, come ad esempio, le tubature del gas.

Per via della propagazione multicammino, riscontrabile in uno scenario urbano ricco di edifici, ogni ostacolo ed irregolarità ha un impatto sull'attenuazione di potenza ma, anche e soprattutto sulla dispersione angolare e temporale.

Trascurare lo scattering significa non capire a fondo il fenomeno di propagazione ed incorrere in errori di sottostima dell'andamento di potenza e privarsi di un realistico grado di dispersione angolare da fornire all'andamento multicammino considerato. In tal modo è possibile evitare problemi di copertura cellulare e ricezione del segnale corretto.

Dato che non è conveniente e realistico costruire un database dettagliato, capace di descrivere in modo esatto ogni singola irregolarità, non si può affrontare il problema con rigore deterministico.

Ciò che si può fare è procedere per via statistica e, quindi, caratterizzare lo scattering come un processo aleatorio trattando la rugosità di superficie quale parametro che riassume in senso medio tutte le irregolarità della parete: si parla, allora, di rugosità efficace. Tramite opportune campagne di misurazioni viene stimata l'ampiezza della rugosità ed è vero che pareti molto rugose ed irregolari producono un contributo di scattering più grande rispetto a pareti quasi idealmente lisce.

### **1.2 Modelli (statistici) di scattering**

In campo scientifico, i ricercatori hanno la necessità di costruire modelli analitici di previsione dell'andamento del campo elettromagnetico, in un ambiente urbano, da includere in software di simulazione in maniera tale da disporre dei necessari strumenti di progetto. Ogni modello analitico si fonda sul concetto di raggio elettromagnetico e su una sorta di rugosità efficace, che può essere definita ed interpretata in modo diverso a seconda del modello considerato ma, in ogni caso, permane l'impostazione statistica del problema.

Quale che sia il modello statistico preso in esame, esso deve essere implementato in uno strumento di previsione a ray-tracing (simulatore) e poter, così, stimare il contributo di potenza diffusa da qualsiasi parete di edificio od ostacolo presente in uno scenario urbano.

## 1 Introduzione

Il primo passo da compiere è l'esecuzione di una campagna di misurazioni, che devono suggerire la formulazione e la calibrazione del modello di scattering diffuso.

Il passo successivo viene eseguito incorporando il modello analitico nel software di simulazione; quest'ultimo è, di certo, basato sul concetto di raggio elettromagnetico.

Infine, bisogna, inevitabilmente, confrontare le misure, usate per calibrare il modello, con le simulazioni a verificare che il modello è in grado di includere gli effetti di diffusione da superfici rugose.

La riduzione della complessità del modello e la capacità di calibrazione usando un numero limitato di misure appaiono questioni importanti.

Il lavoro qui presentato descrive la modellazione dello scattering, causato da superfici dotate di irregolarità, per così dire, dislocate casualmente, in modo da implementare un software a ray-tracing.

Vengono discussi alcuni modelli proposti per includere gli effetti dello scattering da superfici rugose in strumenti deterministici, basati sul concetto di raggio, della previsione della propagazione.

Ogni modello ha la sua complessità ed il suo dominio di validità ma ciò che è comune a tutti è l'approccio statistico in virtù del quale può venire determinata la dispersione angolare rispetto alla componente di potenza associata alla riflessione speculare: la potenza ridotta nella direzione speculare viene distribuita in un dominio angolare.

Eppure, fino a non molto tempo addietro, questi effetti dispersivi non sono stati ritenuti significativi e la loro inclusione nei modelli è stata evitata temendo un grande incremento della complessità del modello e dei tempi di calcolo.

Non a caso gli strumenti di ray-tracing convenzionali elaborano solo i raggi che fanno riferimento a riflessione speculare e a diffrazione; così facendo essi non riescono a descrivere in maniera corretta il fenomeno dello scattering diffuso che assume, invece, un ruolo importante nella valutazione dell'angolo e del tempo di dispersione delle onde radio in contesti urbani complicati da un'alta densità di edifici.

Il capitolo 2 prende in esame, con un certo grado di dettaglio, alcuni dei più significativi ed attrattivi modelli di scattering.

Per ognuno di essi vengono messe in evidenza le condizioni che ne determinano la validità ed il modo in cui i meccanismi fisici coinvolti nei processi di propagazione elettromagnetica vengono trattati da un punto di vista statistico.

## 1 Introduzione

Inoltre, vengono illustrati i modelli di riflessione basati sia sull'Ottica Fisica che su quella Geometrica dal momento che possono costituire un'integrazione ed un compendio ai modelli di scattering, aiutando a comprendere il contesto in cui questi ultimi si collocano.

Più specificamente, si considerano il modello Beckmann-Spizzichino (Ottica Fisica) ed il modello Torrance-Sparrow (Ottica Geometrica).

Il fine ultimo del capitolo 2 del presente lavoro è di presentare un quadro complessivo del fenomeno della propagazione elettromagnetica, capace di illustrare l'impatto significativo su di essa dello scattering diffuso.

Il primo modello di scattering preso in considerazione è quello che può essere chiamato, dal nome del Professore statunitense di riferimento del progetto, "H.Bertoni".

Tale modello si differenzia dagli altri per via del fatto che il punto di partenza è dato dall'applicazione della equazione integrale vettoriale di Kirchhoff-Huygens e, quindi, in sostanza della Teoria della Diffrazione. Si considera che lo scattering non speculari dovuto a facciate di grandi edifici, presenti in un contesto tipicamente urbano, è influenzato in maniera decisiva dal posizionamento, più o meno periodico, delle caratteristiche architettoniche, quali ad esempio finestre e colonne decorative.

E' ragionevole pensare che lo scattering riferito a tale scenario, caratterizzato da una marcata periodicità, si configuri come una forma di diffrazione.

Dal momento che non è possibile disporre di informazioni esatte, in ogni minimo dettaglio, riguardo alla spaziatura delle finestre per ogni edificio, si è proceduto a cercare una formulazione statistica dello scattering ossia una descrizione dello scattering che in modo relativamente semplice e in senso statistico permetta di essere rappresentativa di ogni edificio.

Si è ottenuto tramite la tecnica di simulazione Monte Carlo un modello statistico in grado di dare spiegazione dello scattering da qualsiasi edificio: ogni singolo edificio è considerato alla stregua di una realizzazione, cioè di un campione, di un processo aleatorio.

La peculiarità di questo modello statistico consiste nel fatto che si giunge ad individuare le direzioni di scattering come giacenti lungo due coni, uno in direzione verticale e l'altro in direzione orizzontale, analoghi ai coni di Keller della Teoria della Diffrazione.

Un altro modello che viene esaminato è il modello del Professor W.Wiesbeck.

## 1 Introduzione

Il modello statistico in questione si propone di tener conto dello scattering, di natura stocastica, originato da superfici dotate di rugosità, in strumenti di previsione della propagazione basati sul concetto di raggio e che possono essere definiti deterministici.

La caratteristica fondamentale del modello "W.Wiesbeck" consiste nel fatto che esso si basa sull'approssimazione di piano tangente, analogamente alle formulazioni di Kirchhoff o dell'Ottica Fisica: il campo complessivo in un punto qualsiasi della superficie viene valutato come se l'onda elettromagnetica fosse incidente sul piano tangente in quel punto. Rispetto ad una pura riflessione speculare, in presenza di superfici non idealmente lisce, si hanno piani tangenti diversamente orientati nello spazio ed anche altezze superficiali variabili nei punti di riflessione.

In definitiva, tale approccio definisce la rugosità di una superficie tramite una distribuzione di probabilità delle altezze ed una lunghezza di correlazione e, poi, giunge a determinare, facendo ricorso al ray-tracing, il numero di raggi in arrivo al ricevitore e la loro orientazione.

Si può anche affermare che, nell'ambito di un approccio statistico e facendo esplicitamente uso della Teoria della Probabilità nel definire una sorta di rugosità superficiale, gli effetti di dispersione angolare vengono stimati tramite la superficie di riflessione.

Sulla scia di tale modello si colloca il modello "M.Herben". Anch'esso procede ad una caratterizzazione della rugosità superficiale in senso statistico trasformando la distribuzione di probabilità delle altezze di superficie in pendenze dei piani tangenti.

Ciò che differenzia tale modello da quello precedente è che si descrive la probabilità che un raggio giunga effettivamente al ricevitore invece di determinare il numero dei raggi in arrivo e la loro orientazione.

Ciò equivale a dire che la dispersione angolare viene modellata direttamente in ricezione e non stimata tramite la superfici di riflessione.

Gli ultimi due modelli esaminati sono accomunati dal fatto che, entrambi, assegnano una rugosità efficace di carattere stocastico ad una data superficie. Gli effetti di scattering di una superficie rugosa vengono modellati tramite la considerazione di un insieme casuale di elementi o micro faccette (piani tangenti locali) la cui distribuzione determina l'effetto risultante, complessivo, di scattering.

## 1 Introduzione

Allora, si può parlare di definizione della superficie rugosa nel senso di un insieme casuale di elementi.

### **1.3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering come processo aleatorio**

A proposito dell'ultimo modello preso in esame, si può, invece, parlare, e con ciò si chiarisce la differenza rispetto ai precedenti modelli, di definizione della rugosità di superficie nel senso, vero e proprio, di una rugosità efficace.

Il modello proposto attribuisce una rugosità efficace ad ogni tipologia di edificio e suddivide una parete di edificio in elementi, o "mattonelle" elementari, per ognuno delle quali è possibile assumere un diagramma di scattering Lambertiano o direttivo a singolo o doppio lobo ossia ipotizzare una diversa modalità di diffusione di una certa tipologia di parete.

Inoltre, ad ogni parete viene associato un coefficiente di scattering visto come rapporto dell'intensità del campo di scattering rispetto a quella del campo incidente, o più realisticamente, del campo riflesso; si considera anche un fattore di perdita di riflessione col quale tenere conto della perdita di potenza in direzione speculare.

Pochi parametri permettono di adattare il modello al tipo di parete considerata, variando non solo la porzione di potenza effettivamente diffusa, ma, anche, la modalità con cui essa viene effettivamente irradiata attraverso la regolazione del diagramma di scattering.

Il modello "a rugosità efficace" è, dunque anch'esso, statistico, seppure con una connotazione diversa rispetto ai modelli precedenti. Di certo, esso presenta delle varianti grazie alle quali è possibile studiare gli effetti di scattering in diverse situazioni ambientali potendo scegliere diversi diagrammi di scattering e differenti coefficienti di scattering: la sua relativa semplicità e la sua flessibilità ne costituiscono evidenti pregi.

Nel capitolo 3, con riferimento al modello a rugosità efficace o, anche detto, "effective roughness model", si cerca di procedere ad una formalizzazione dello scattering quale processo aleatorio.

## 1 Introduzione

Dopo aver illustrato gli elementi fondamentali dell'Ottica di Fourier, che si configura come un potente strumento concettuale di cui disporre per via del legame fornito tra dominio angolare e una sorta di dominio dello spazio.

Il fronte d'onda emergente da una "mattonella elementare" di estensione finita si può intendere, in regione di campo lontano, come una sovrapposizione di onde piane dirette in ogni direzione. Queste sono le componenti di Fourier che vanno in tutte le direzioni con specifici valori della frequenza angolare.

Con riferimento per semplicità al fenomeno della diffrazione, il termine con frequenza angolare nulla corrisponde all'onda non deviata, mentre le frequenze angolari più alte formano un angolo maggiore con l'asse ottico.

Viene discusso il fenomeno dello scattering diffuso in termini di processo aleatorio, funzione di date variabili quali, ad esempio, la direzione di arrivo dell'onda incidente e lo spazio.

Si mette in evidenza il legame permesso dall'uso della trasformata doppia di Fourier, lecito solo, è bene sottolinearlo, nel rispetto di certe condizioni, tra spettro di onde piane del campo diffuso e distribuzione del campo diffuso nello spazio.

Infine, la funzione di autocorrelazione permette di ricavare il "power-angle profile" di scattering.

Nel capitolo 3 si illustra l'importanza pratica della funzione di correlazione (o autocorrelazione) quale misura di indipendenza statistica: essa, infatti, è pari a zero se due processi sono completamente scorrelati.

Un'ipotesi fondamentale ai fini della formalizzazione dello scattering quale processo aleatorio è data dall'ergodicità del processo stesso.

Un processo stocastico è ergodico se è possibile ricavare le sue proprietà statistiche dall'esame di una sola realizzazione del processo e, di conseguenza, la condizione di ergodicità consente di stabilire la statistica di un processo da una sola realizzazione: le medie statistiche vengono, così, a coincidere con quelle temporali.

Ne discende che il risultato dell'autocorrelazione fornisce il contenuto energetico del segnale, permettendo di fare considerazioni valide per una distribuzione di potenza angolare (o power-angle profile) ossia per il diagramma di scattering: a partire dalla Teoria della Probabilità, sotto le condizioni di validità opportune, si giunge a fare valutazioni di carattere energetico.

### 1.4 Simulazioni

Il capitolo 4 è relativo alle simulazioni eseguite con riferimento al modello a rugosità efficace ed, in particolare, ad una formulazione che consente il calcolo analitico del power-angle profile riferito allo scattering distribuito.

Per sua natura lo scattering diffuso è un fenomeno distribuito dal momento che scaturisce da ogni singola "mattonella elementare": formule analitiche relativamente semplici sono importanti poiché permettono di risparmiare risorse di calcolo per la previsione della propagazione.

Considerazioni significative riguardano la modalità di discretizzazione della parete dal momento che ogni elemento di superficie produce un contributo di scattering con un differente angolo di arrivo in ricezione ed un diverso ritardo di tempo.

Si sono eseguite diverse simulazioni in uno scenario urbano con l'obiettivo di valutare il tempo di calcolo, relativamente alla modalità di discretizzazione adottata, e l'accordo con le misure prese a riferimento.

In particolare, vengono posti a confronto i grafici multidimensionali, che descrivono la potenza rispetto al numero dell'antenna ricevente ed all'angolo di azimuth, ricavati facendo la simulazione a ray-tracing completa con quelli ottenuti combinando il ray-tracing, applicato senza tener conto dello scattering, con il contributo valutato tramite l'adozione del modello analitico.

Lo scenario considerato si riferisce ad un particolare ambiente urbano con misure eseguite nella città di Helsinki: ci si riferisce ad esse col termine "route 4".

## **2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici**

### **2.1 Significato dello scattering nella propagazione urbana e modelli analitici di previsione**

In ambiente urbano, dove raramente esiste una linea di vista tra trasmettitore e ricevitore, il meccanismo fondamentale di propagazione è spiegato dall'interazione delle onde radio con gli ostacoli. In particolare, in aree ad alta densità abitativa, gli edifici generano un gran numero di cammini multipli, attenuazione, distorsione lungo il cammino del segnale.

Lo studio della propagazione delle onde radio impone la conoscenza di tutti i fenomeni di interazione con pareti di edifici, balconi, colonne, al fine di costruire modelli analitici di previsione del campo da implementare in strumenti software di simulazione ed avere, così, la possibilità di progettare in modo corretto un sistema radio mobile.

Risulta chiaro che, in presenza di pareti di edifici non classificabili come lisce od omogenee, non ci si può affidare esclusivamente all'Ottica Geometrica ma si deve considerare un fenomeno aggiuntivo: lo scattering. Lo scattering è un fenomeno di interazione nel quale un'onda incidente incontra una superficie rugosa o un insieme numeroso di ostacoli localizzati in modo casuale e come tale deve essere studiato in termini statistici.

Addirittura è possibile estendere la definizione di scattering o diffusione considerando tale processo in senso globale, riassuntivo dei fenomeni di riflessione, diffrazione e rifrazione che si verificano nei casi in cui non si possono applicare i principi fondati sulla idealizzazione di superfici lisce, regolari ed omogenee. In tale caso non è possibile avere informazioni dettagliate sulla configurazione della superficie su cui incide l'onda elettromagnetica ossia non è possibile tenere esattamente in conto le effettive irregolarità di ogni parete presa in esame.

L'unica via percorribile nella trattazione dello scattering, cioè di segnali diffusi in direzione non speculare da pareti di edifici non classificabili come piane e levigate, è quella di procedere per via statistica ideando modelli dei diversi scenari reali affrontati.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

Studi recenti hanno chiarito il ruolo fondamentale rivestito dallo scattering diffuso (o distribuito) nella determinazione della dispersione angolare e temporale del canale radio. Eppure, la previsione della propagazione radio tramite ray-tracing (o ray-launching) di solito ipotizza che la riflessione sugli edifici si esprima solo come riflessione speculare. Non si tiene, purtroppo, conto degli effetti di scattering diffuso e di dispersione angolare causati da tutte le irregolarità di superficie e di volume dei materiali.

Fino a poco tempo fa, questi effetti non sono stati inclusi nella progettazione dei sistemi radio mobili anche temendo un grande incremento della complessità dei modelli. Soprattutto per quanto concerne l'uso di sistemi MIMO, la dispersione angolare e, quindi, lo scattering stanno diventando sempre più importante e trascurarli significa non comprendere in modo corretto la propagazione delle onde radio.

I diversi effetti dell'interazione di un'onda elettromagnetica su una superficie non necessariamente piatta e liscia devono essere incorporati in modelli statistici di previsione della propagazione, basati sul concetto di raggio e implementati in software a ray-tracing.

Sono possibili diversi approcci per modellare lo scattering causato da superfici dotate di irregolarità dislocate casualmente e, difatti, sono stati costruiti modelli differenti per includere lo scattering di natura stocastica in modelli deterministici di propagazione delle onde radio fondati sul concetto di raggio. In ogni caso gli effetti dello scattering da superfici rugose possono essere considerati solo se i modelli sono a bassa complessità, vale a dire statistici. Di seguito, vengono presi in esame alcuni significativi modelli di scattering, ognuno dei quali con una propria complessità e un dominio di validità.

### **2.2 Scattering speculare e non speculare da facciate di edifici (H. Bertoni).**

Lo scattering non speculare causato dall'interazione dell'onda elettromagnetica su facciate di grandi edifici è dominato da finestre e, in genere, da muratura decorativa il cui posizionamento è all'incirca periodico. Proprio questa periodicità suggerisce come lo scattering possa assumere la forma della diffrazione: considerando singoli edifici, la struttura periodica della facciata dell'edificio genera singoli ordini di diffrazione anziché un continuo di *"diffuse scattered power"*.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

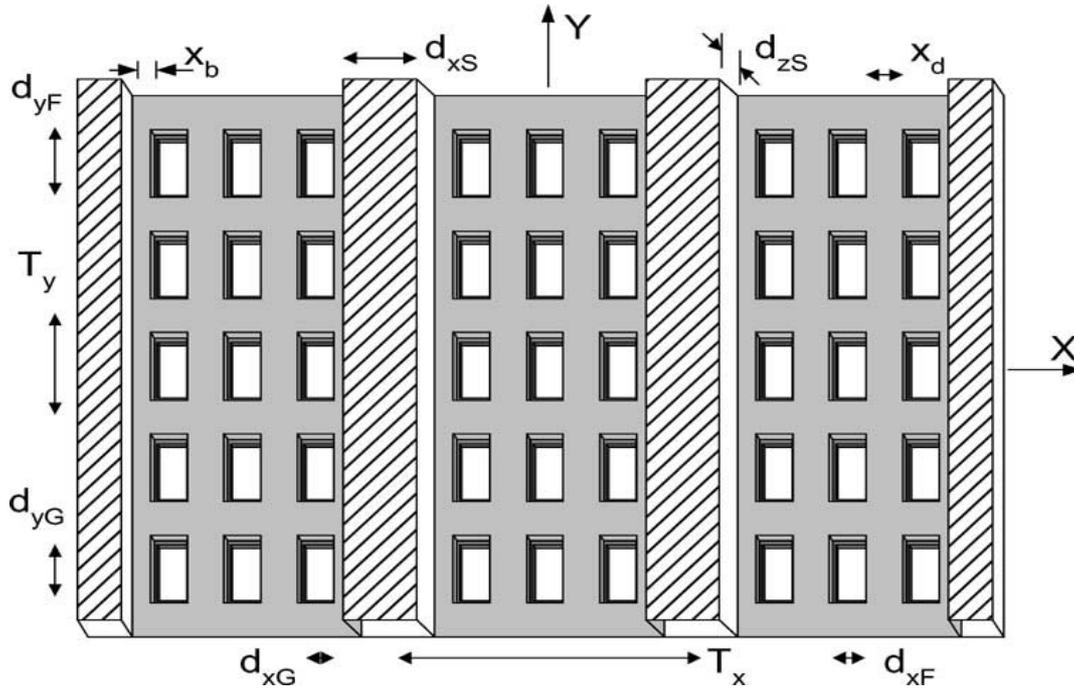


Fig. 2.1: Modello di facciata di edificio con tre finestre consecutive ( $N=3$ ) e periodicità orizzontale  $T_x$ .

La generica facciata di edificio è costituita da un piano di muratura liscia con  $N$  finestre consecutive posizionate periodicamente, separate da una striscia verticale sporgente dalla superficie principale. Le finestre hanno telai metallici e sono, per ogni gruppo, poste ad una distanza  $x_d$  tra loro. Il vetro delle finestre ha dimensione ( $d_{xG} \times d_{yG}$ ), mentre le dimensioni esterne sono ( $d_{xF} \times d_{yF}$ ). Le strutture decorative sono intese come strisce verticali di larghezza  $d_{xS}$  che sporgono di  $d_{zS}$  dall'area principale in mattoni.

I periodi lungo la direzione orizzontale e quella verticale sono, rispettivamente,  $T_x$  e  $T_y$ . Si suppone che un'onda su un piano obliquo illumini la facciata con campo elettrico  $\vec{E}_{inc}(\vec{r}')$  nel piano della facciata. Il campo riflesso  $\vec{E}_{ref}(\vec{r}')$  nel piano della facciata è valutato uguale al campo incidente moltiplicato per il coefficiente locale di riflessione  $\Gamma_{TE}$  o  $\Gamma_{TM}$ , rispettivamente per polarizzazione perpendicolare (TE) o parallela (TM) al piano di incidenza.

Si assume che l'origine del sistema di coordinate sia nel centro della superficie di scattering e che si osservi in regione di campo lontano. Poi, il campo incidente obliquo deve essere decomposto nelle componenti di polarizzazione perpendicolare (TE) e parallela (TM).

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

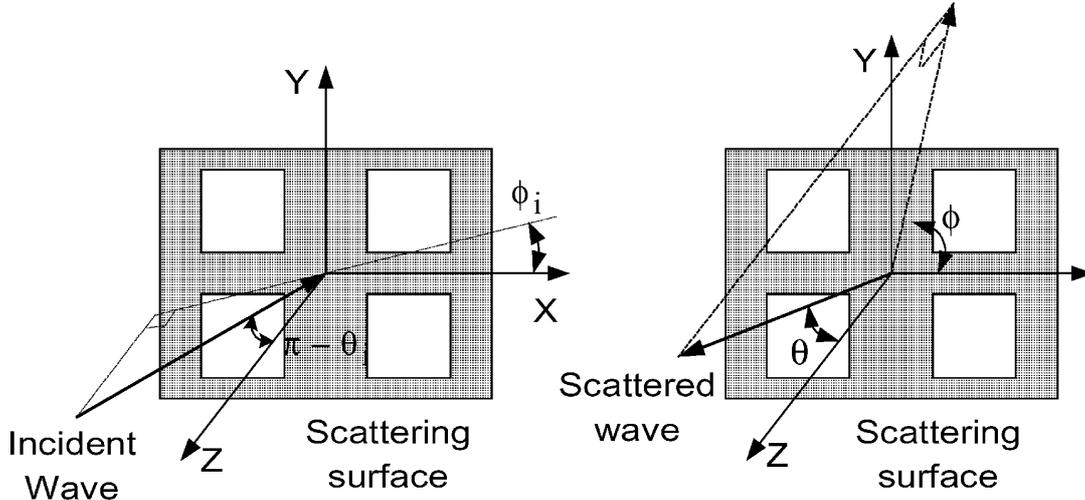


Fig. 2.2: Sistema di coordinate sferiche per valutare il campo diffuso

Dal momento che si suppone che la facciata dell'edificio è periodica, è lecito procedere alla decomposizione del campo diffuso, espresso nella forma dell'equazione integrale vettoriale di Kichhoff-Huygens, in una serie di onde armoniche nello spazio:

$$\vec{E}_S = \iint_A [j\omega\mu_0 \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \hat{n} \times \vec{H}_{ref}(\vec{r}') + \nabla \times \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot (\hat{n} \times \vec{E}_{ref}(\vec{r}'))] dA'$$

dove  $\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}')$  è la funzione di Green nello spazio libero in regione di campo lontano;  $\vec{r}$  e  $\vec{r}'$  indicano rispettivamente la posizione dell'elemento di area  $dA'$  sulla parete e del punto di osservazione,  $\hat{n}$  il versore normale uscente dall'elemento  $dA'$  e, infine,  $K = 2\pi/\lambda$  rappresenta il numero d'onda. Tramite opportune manipolazioni algebriche, si individua una funzione dei coefficienti di riflessione all'interno dell'espressione del campo diffuso che può essere scritta come somma di tre termini: il primo termine tiene conto della riflessione della sola muratura, supponendo che essa sostituisca le finestre e i telai metallici; il secondo termine fornisce una sorta di correzione per la riflessione dai telai metallici, ipotizzando che il metallo rivesta l'intera finestra e, per ultimo, si recupera la riflessione dovuta al vetro della finestra.

Proprio perché questi tre termini sono periodici possono venire sviluppati tramite una serie di Fourier:

$K_x = K \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$  e  $K_y = K \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$  sono le componenti del numero d'onda lungo l'asse x e l'asse y;

$K_{xn} = K_{xi} + 2n\pi/T_x$  ;  $K_{ym} = K_{yi} + 2m\pi/T_y$  forniscono, quindi, le direzioni dei modi di propagazione della struttura.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

In questo contesto, la direzione di riflessione speculare è data da  $n=m=0$  e  $K_{xi}$  nonché  $K_{yi}$  si riferiscono alla direzione di incidenza. Appare chiaro che differenti realizzazioni di edifici hanno diversa periodicità e, conseguentemente, diversi  $K_{xn}$  e  $K_{ym}$  dei modi.

Comprensibilmente, si è cercata una descrizione dello scattering che in qualche senso statistico sia rappresentativa di ogni edificio in modo da ovviare al fatto che i database degli edifici usati per il Ray-Tracing non includono informazioni dettagliate quali la spaziatura delle finestre per ogni edificio. Si è trovata una funzione di scattering continua che rappresenti una media di tutti gli edifici: ogni singolo edificio viene visto come una realizzazione di un processo aleatorio.

Il calcolo dello scattering per un gran numero di facciate di edifici consente di ottenere una media delle proprietà di scattering e, alla fine, un coefficiente di scattering rappresentativo di ogni edificio. Ne risulta una legge che assume i connotati di quella di diffrazione e dallo sviluppo matematico, in considerazione del fatto che le facciate di edificio sono verticali od orizzontali (spigoli della struttura verticale e spigoli orizzontali delle finestre), lo scattering si verifica soprattutto lungo le direzioni tali che il numero d'onda in direzione verticale è lo stesso di quello dell'onda incidente e analogamente lungo la direzione orizzontale.

Tali condizioni sono soddisfatte lungo due coni analoghi ai coni di Keller della Teoria della Diffrazione. I coni si intersecano lungo la fondamentale direzione di riflessione speculare e, per una incidenza normale, si estendono a tutto il piano verticale e a quello orizzontale. In conseguenza di ciò la funzione di scattering ha significato solo sulle direzioni che giacciono sui due coni considerati.

Con riferimento alla figura nella pagina seguente, le direzioni di scattering nei due coni possono essere descritte tramite l'uso degli angoli  $\Psi_x$  e  $\Psi_y$ : il primo è l'angolo tra la proiezione del vettore numero d'onda sul piano ortogonale all'asse y e la direzione z normale alla parete; il secondo è l'angolo tra la proiezione del vettore numero d'onda sul piano ortogonale a x e l'asse z. Quindi, la direzione di propagazione nei piani perpendicolari agli assi dei coni sono definiti come:

$$\tan(\psi_x) = k_{xn}/k_z = k \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) / k \cdot \cos(\theta) = \tan(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \text{per i modi } (n,0)$$

$$\tan(\psi_y) = k_{ym}/k_z = k \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) / k \cdot \cos(\theta) = \tan(\theta) \cdot \sin(\phi) \quad \text{per i modi } (0,m)$$

Ebbene, un'onda piana incidente sulla superficie dell'edificio viene diffusa in una maniera simile alla diffrazione da spigoli.

2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

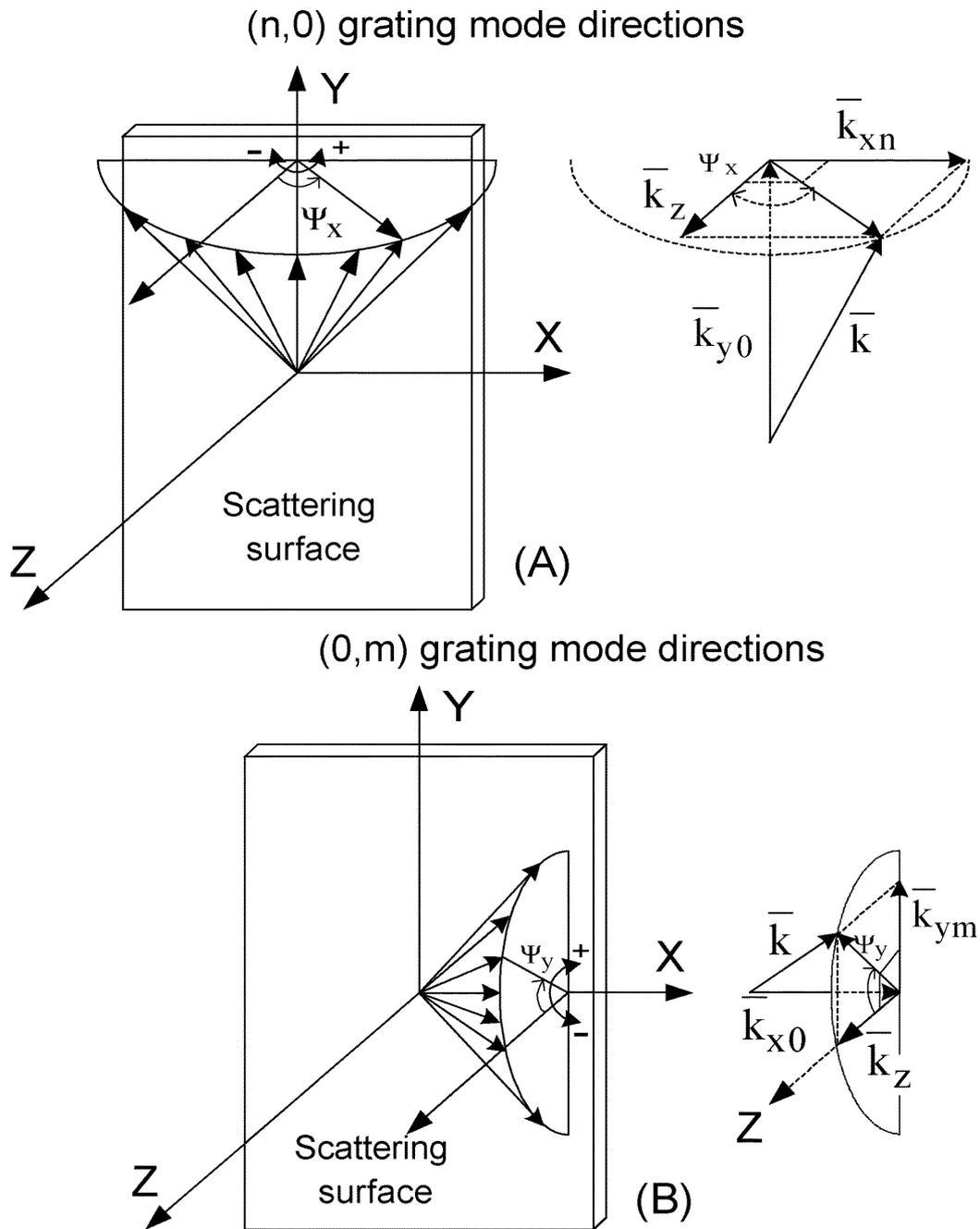


Fig. 2.3: Componenti  $\vec{k}_{xn}$ ,  $\vec{k}_{ym}$ ,  $\vec{k}_z$  del vettore numero d'onda di: (a) modi di propagazione (n,0) e (b) modi (0,m).

Un passo importante della procedura adottata in questo approccio è che dall'uso dell'equazione integrale vettoriale di Kirchhoff-Huygens si ricava il diagramma di scattering per ogni singola realizzazione, cioè per ogni singolo edificio. Poi, si usa la tecnica

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

di simulazione Monte Carlo in modo da creare un singolo modello statistico valido per tutti gli edifici. In presenza di una notevole complessità data dal gran numero dei parametri di cui tener conto per l'edificio in esame, si ricorre alla simulazione Monte Carlo per ottenere il valor medio e la deviazione standard dei campi ricavati per le singole realizzazioni.

Il punto di partenza è dato dalla costruzione di un database di 50000 realizzazioni di strutture di edifici. Dato che ogni facciata di edificio viene vista come una realizzazione di un processo aleatorio, si deve scomporre il campo diffuso in una componente media e in una componente indicativa della deviazione standard del campo diffuso rispetto al valore medio:

$\vec{E}_S = \langle \vec{E}_S \rangle + E_{S,f}$ , dove il primo termine è rappresentativa della media di insieme su tutte le realizzazioni e il secondo indica la parte, per così dire, fluttuante.

Ricavato il campo diffuso, si definisce il coefficiente di scattering dipendente dalla direzione  $\sigma(\theta, \varphi)$ : esso viene moltiplicato per la potenza incidente e integrato sul semispazio per ottenere la media di insieme della potenza totale diffusa.

Analogamente, si può definire il coefficiente di scattering relativo alla media di insieme dei campi coerenti  $(\langle \vec{E}_S \rangle)$  e non coerenti:

$$\sigma = \sigma_{co} + \sigma_{nco}$$

Si sono graficati i coefficienti di scattering totale, coerente ed incoerente (figura 2.4) e si può dedurre che la componente speculare di  $\sigma_{nco}$  è circa 10 DB più piccola di quella di  $\sigma_{co}$  e ciò può implicare che il coefficiente di scattering incoerente nella direzione speculare è trascurabile.

E' importante notare che la potenza diffusa risulta concentrata attorno alla direzione speculare ed è significativa solo nelle direzioni per cui  $k_y = k \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) = k_{yi}$  o  $k_x = \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) = k_{xi}$ , dove il pedice  $i$  indica la direzione di incidenza. La potenza diffusa per  $k_y = k_{yi}$  è fornita dai modi  $(n, 0)$ , mentre quella per  $k_x = k_{xi}$  è fatta risalire ai modi  $(0, m)$ .

Un altro modo di rappresentare le direzioni di propagazione è indicato dai grafici della figura 2.5, che mostrano la variazione del coefficiente di scattering rispetto agli angoli  $\psi_x$  (cono verticale) e  $\psi_y$  (cono orizzontale) per frequenza pari a 900 MHz e vari angoli  $\theta_i$  di incidenza dell'onda piana. Per incidenza normale lo scattering è simmetrico in  $(\theta, \varphi)$  ma, appena l'incidenza diventa radente, lo scattering nel piano orizzontale diventa asimmetrico rispetto alla direzione speculare.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

Detta  $P$  la potenza media di insieme totale diffusa nel semispazio e  $P_{inc}$  la potenza totale incidente sulla facciata dell'edificio si può scrivere:

$P = P_{co} + P_{nco}$  in accordo con la scomposizione di  $\sigma$  in  $\sigma_{co}$  e  $\sigma_{nco}$  e, in maniera analoga, si possono eseguire simulazioni per valutare i rapporti di potenza  $P_{co}/P_{inc}$  e  $P_{nco}/P_{inc}$  che confermano quanto ipotizzato e già visto nei precedenti grafici.

Tra l'altro è possibile esprimere la percentuale della potenza incidente che, in realtà, viene trasmessa attraverso la parete dell'edificio nel seguente modo:

$100 - [P_{co}/P_{inc} + P_{nco}/P_{inc}]$  e che risulta grande a fronte di una polarizzazione e di angoli di incidenza che soddisfano la condizione di Brewster.

Per quanto riguarda la dipendenza dalla frequenza dei coefficienti di scattering, si può dire che essa si esprime in termini di una intensità più grande ma anche di una ampiezza angolare più limitata all'aumentare della frequenza. Quando si calcola la potenza totale diffusa questi due effetti opposti si cancellano a vicenda di modo che l'andamento complessivo non risente della dipendenza dalla frequenza.

Se si vuole essere più precisi, è possibile affermare che la potenza diffusa totale nella direzione speculare è più o meno indipendente dalla frequenza, mentre quella nelle direzioni non speculari varia debolmente con la frequenza stessa.

A partire dalle simulazioni, in questo tipo di approccio alla descrizione statistica dello scattering da facciate di edifici, si è proceduto a modificare per tentativi ed errori le funzioni analitiche in modo da adattare ai grafici ricavati a garanzia anche della reciprocità tra gli angoli di incidenza e quelli di scattering.

In effetti, per angoli di incidenza vicini alla direzione normale ciò viene garantito ma, appena l'angolo di incidenza si sposta verso un'incidenza radente, la potenza diffusa tende ad allontanarsi dalla direzione speculare.

Le misure effettuate vengono, poi, confrontate con le previsioni fatte nell'ipotesi di superfici piate e lisce. Ebbene, nel caso esaminato di grandi edifici con finestre spaziate periodicamente, le misure indicano una diminuzione del picco di potenza in direzione speculare di 8-12 DB e scattering in direzioni non speculari più accentuato di quanto stimato per una superficie piata. Dalle misurazioni fatte, si ha anche la chiara indicazione che lo scattering si concentra attorno alla direzione speculare e, come tale, non può obbedire alla legge di Lambert.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

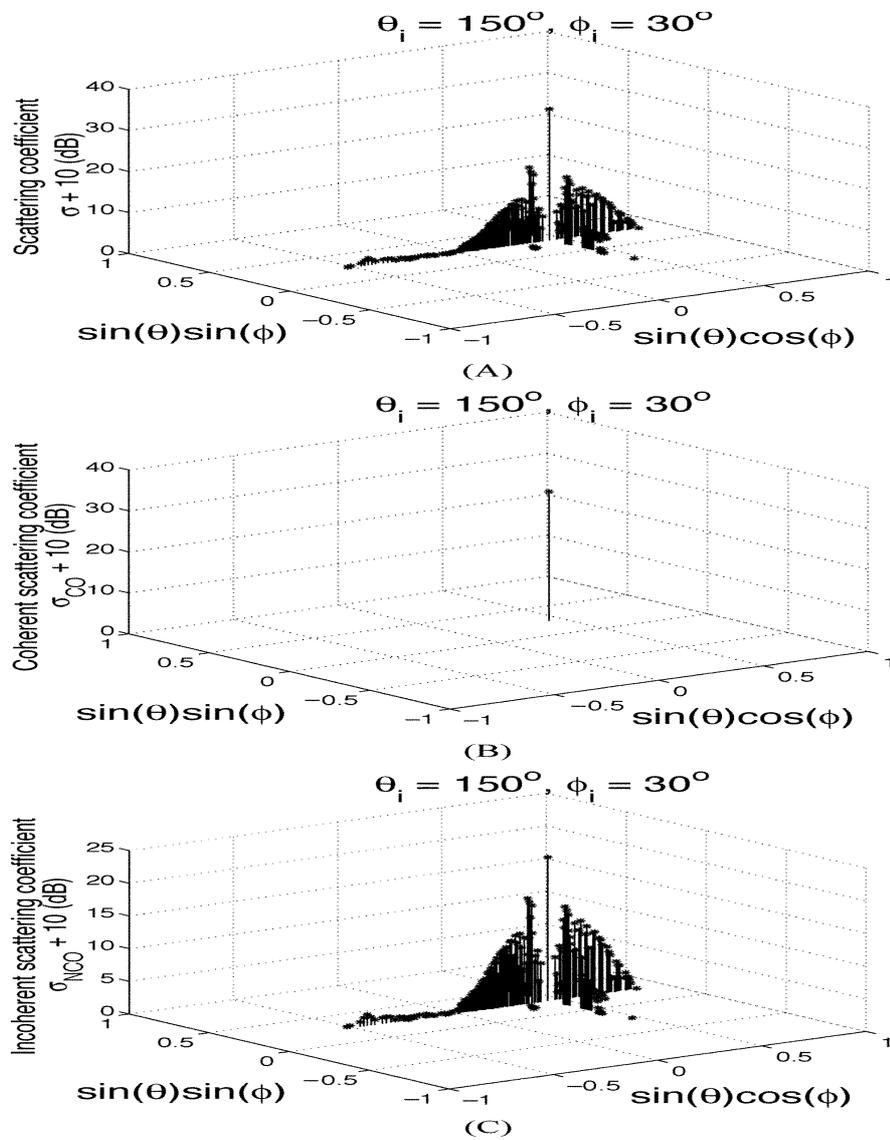


Fig. 2.4: Grafici 3-D dei coefficienti di scattering.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

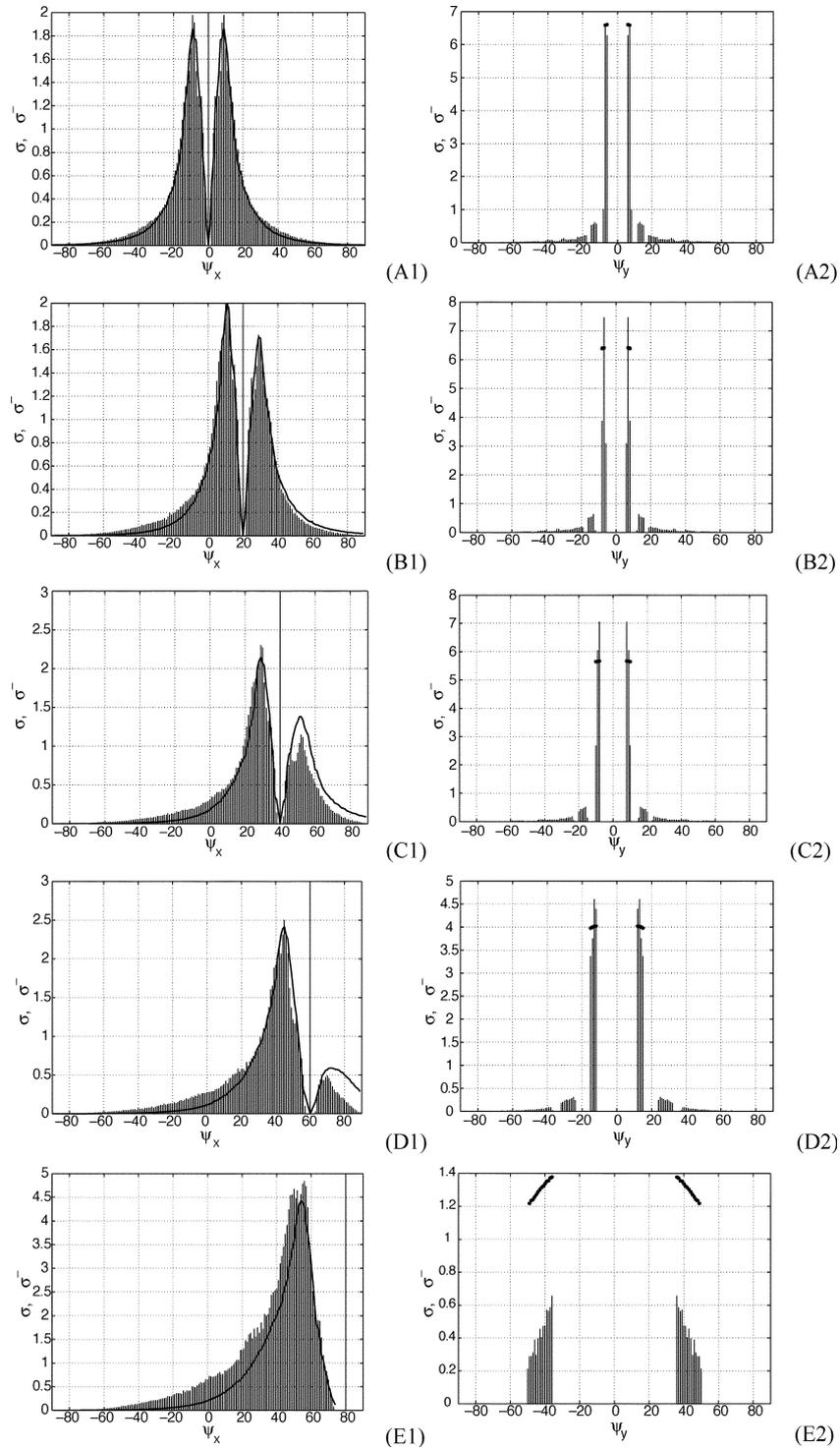


Fig. 2.5: Grafici del coefficiente di scattering rispetto agli angoli  $\psi_x$  e  $\psi_y$  per: (a)  $\vartheta_i=180^\circ$ , (b)  $\vartheta_i=160^\circ$ , (c)  $\vartheta_i=140^\circ$ , (d)  $\vartheta_i=120^\circ$ , (e)  $\vartheta_i=100^\circ$ .

### **2.3 Un approccio per includere scattering stocastico da superfici rugose in modelli deterministici di propagazione a raggio delle onde radio (W. Wiesbeck).**

Tale approccio viene usato assieme al Ray-Launching ed, analogamente, ai metodi di Kirchhoff o dell'Ottica Fisica, si fonda sull'approssimazione di piano tangente. Questi metodi sono validi per superfici le cui dimensioni orizzontali sono grandi rispetto alla lunghezza dell'onda incidente.

Quando un'onda incide su una superficie di estensione idealmente infinita e perfettamente liscia, essa viene riflessa nella direzione speculare in accordo con la legge di riflessione di Snell; il campo riflesso può essere determinato usando i coefficienti di riflessione di Snell. Però, la rugosità di superficie impone che una porzione dell'energia venga diffusa in direzioni che non sono quella speculare, frazionandosi in una componente cosiddetta coerente ed in una incoerente. In tal senso, la parte coerente dell'energia diffusa viene descritta come il valore medio del campo diffuso, mentre la componente incoerente è caratterizzata dalla deviazione standard rispetto al valore medio.

La componente coerente del campo reirradiato diminuisce all'aumentare della rugosità di superficie; al contrario la parte incoerente o diffusa aumenta la sua rilevanza .

Si può dire che l'approccio, preso qui in esame per includere lo scattering stocastico da superfici rugose in modelli deterministici fondati sul concetto di raggio ottico, costruisce realizzazioni istantanee del processo aleatorio di scattering espandendo la modellazione deterministica in virtù di una componente stocastica.

Come punto di partenza, si deve definire in modo quantitativo la rugosità di superfici, che hanno una distribuzione arbitraria delle altezze della superficie stessa. Si ricorre ad una misura basata sulla deviazione standard, indicativa delle variazioni dell'altezza rispetto al suo valore medio,  $\sigma_h$  , e sulla sua lunghezza di correlazione  $L$  (dipendenza statistica delle altezze in due differenti punti posti sulla superficie).

All'aumentare di  $\sigma_h$  e al diminuire di  $L$ , la rugosità di superficie, così definita, diventa più rilevante. Tra l'altro un criterio cui fare riferimento per la rugosità è formulato

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

da Fraunhofer secondo cui se  $\sigma_h < \lambda_o / [32 \cdot \cos(\theta_{INC})]$  una superficie, a buon diritto, può essere considerata liscia.

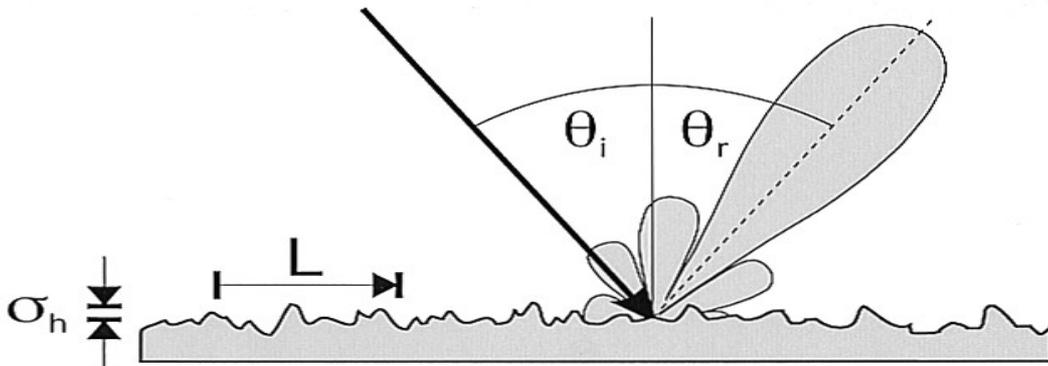


Fig. 2.6: Caratterizzazione di una superficie rugosa tramite l'uso di una deviazione standard  $\sigma_h$  dell'altezza di superficie e della sua lunghezza di correlazione  $L$ .

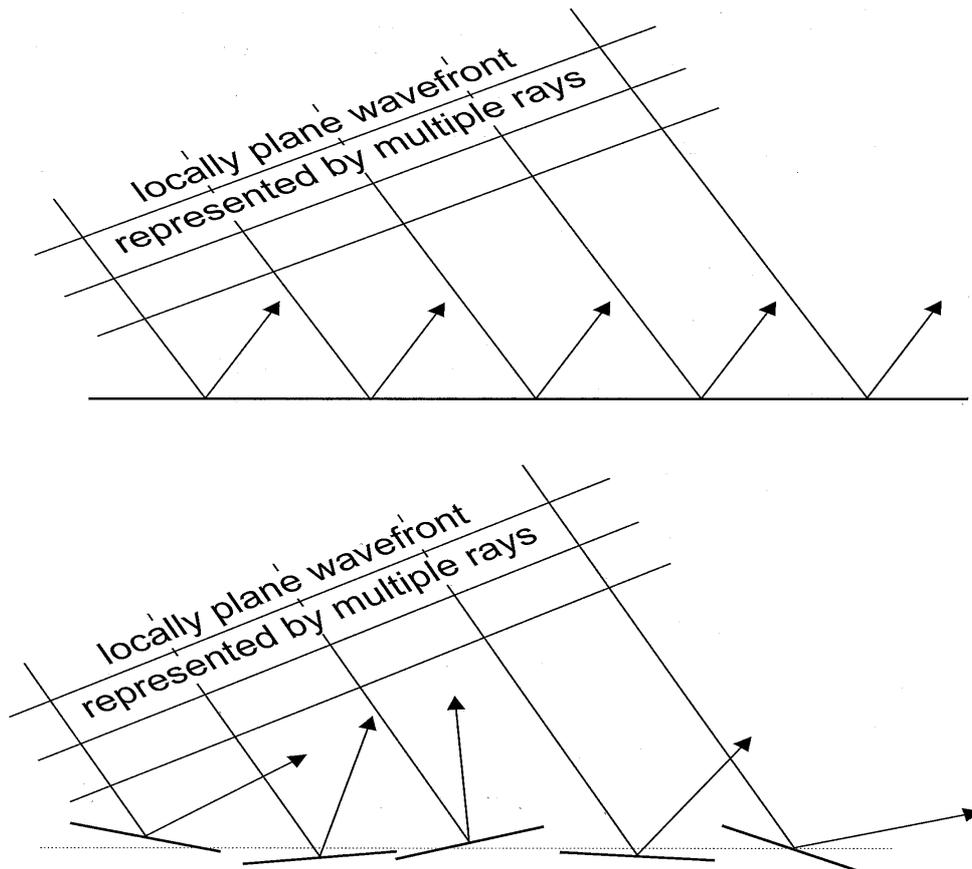
Tale equazione consegue dal fatto che la differenza di fase esistente tra due raggi riflessi a due diverse altezze sulla superficie deve essere inferiore a  $\pi/8$  al fine di poterli combinare coerentemente in regione di campo lontano ossia di poterli considerare in fase, come se la superficie fosse liscia. In presenza di una lieve rugosità di superficie, cioè se  $\sigma_h \ll \lambda_o$ , la componente diffusa diventa trascurabile e, quindi, lo scattering della componente coerente risulta approssimato bene dalla sola riflessione. Come fatto aggiuntivo, si registra una diminuzione della densità di potenza nella direzione speculare, rispetto ad una semplice riflessione, e ciò è dovuto ad una cancellazione parziale delle fasi variabili in senso aleatorio.

L'approccio, in esame, prende come riferimento l'approssimazione scalare di Kirchhoff, valida per superfici poco rugose e che considera solo il valor medio della componente coerente di scattering, e l'approssimazione di Kirchhoff a fase stazionaria per superfici molto rugose, che si esprime in termini del solo valore quadratico medio della componente incoerente o di scattering diffuso. A differenza di tali metodi, qui si applica la procedura ad una rugosità arbitraria al fine di ricavare l'intensità media complessiva di scattering, comprendente sia la parte coerente che incoerente dell'energia.

Ecco perché si è detto che l'approccio stocastico di scattering, qui esaminato, considera realizzazioni istantanee di un processo di scattering e contiene al tempo stesso componenti coerenti ed incoerenti. Poi, i valori medi delle componenti coerenti ed in-

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

coerenti di scattering possono essere ottenuti facendo uso di simulazioni Monte Carlo mediando su un gran numero di realizzazioni.



*Fig. 2.7: Approccio stocastico di scattering: riflessione su piani tangenti orientati casualmente per ogni raggio discreto: (a) stesso piano per tutti e (b) piani con orientazione casuale.*

Il campo totale in qualsiasi punto della superficie può essere calcolato come se il raggio sia incidente sul piano tangente in quel punto. Dal momento che per ogni raggio discreto si genera un differente piano tangente, è corretto affermare che i piani tangenti sono "locali".

Rispetto alla pura riflessione speculare su una superficie idealmente liscia, piatta, si deve prendere atto di una diversa orientazione dei piani tangenti e di una variabilità

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

delle altezze di superficie nei vari punti di riflessione: la conseguenza è che si ha scattering significativo in direzioni che non sono quella speculare.

Ciò che è importante sottolineare è che le variazioni dei piani tangenti locali devono essere associate alle proprietà della specifica superficie rugosa.

Senza altro, l'altezza di superficie rugosa può essere ritenuta distribuita normalmente (distribuzione Gaussiana con valore medio nullo e varianza  $\sigma_h^2$ ):

$$P_h(h) = 1/(\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_h) \cdot e^{-1/2 \cdot (h/\sigma_h)^2}$$

e supponiamo che il coefficiente di autocorrelazione  $\Phi_{hh}(l)$  sia anch'esso Gaussiano:

$\Phi_{hh}(l) = e^{-l^2/L^2}$  ad indicare la correlazione tra l'altezza aleatoria  $h$  in due punti della superficie posti ad una distanza  $l$  l'uno dall'altro.

Allora, la pendenza  $\theta$  di una superficie 1-D, distribuita normalmente  $h(x)$ , è definita da  $\tan(\theta) = h' = dh/dx$  ed è anche essa distribuita normalmente con valore medio nullo e varianza  $\sigma_{h'}^2$ . Si giunge a trasformare  $P_h(h')$  in  $P_\theta(\theta)$  cioè la distribuzione delle pendenze. In particolare si ha  $\sigma_{h'} = (\sqrt{2} \cdot \sigma_h) / L$ .

In generale per una superficie 2-D vale  $h=h(x,y)$  e si parla in termini di piano tangente locale ad orientazione aleatoria avente le medesime proprietà statistiche di una superficie rugosa di tipo Gaussiano con una data deviazione standard.

A questo punto appare chiaro che i piani tangenti locali in ogni punto di riflessione variano in accordo con una distribuzione Gaussiana delle altezze di superficie e la  $P_\theta$  trovata a partire da  $P_h$ .

Nell'area di raccolta dei raggi riflessi, viene fatta sia un'analisi coerente (calcolo del campo elettrico) sia una analisi incoerente (calcolo di potenza). Per produrre il desiderato diagramma di scattering, la procedura (discretizzazione nel dominio angolare) è ripetuta molte volte in modo tale da ricavarne una media. Il passo successivo consiste nel trasformare i risultati per produrre le matrici di Radar Cross Section per unità d'area onde consentire un confronto diretto con i modelli analitici di Kirchhoff che costituiscono la base del metodo adottato.

Il campo diffuso è funzione della matrice complessa (con polarizzazione) di scattering  $S$ . Le componenti della matrice RCS sono legate a quelle della matrice di scattering dalla relazione:

$\sigma_{PQ} = 4\pi \cdot |S_{PQ}|^2$  [ metri quadri], dove gli indici  $p$  e  $q$  indicano qualunque combinazione delle componenti ortogonali nel dominio angolare  $(\theta, \phi)$ .

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

La Radar Cross Section serve per quantificare l'ampiezza dello scattering: è un'area efficace, equivalente all'area che assorbe la potenza incidente necessaria affinché un diffusore isotropo generi in ricezione la stessa intensità di radiazione del reale fenomeno di scattering direttivo.

Tramite il Ray-Tracing si ricava il valore del campo diffuso che viene, poi, sostituito nell'espressione  $\vec{E}_S(\vec{r}_S) = (e^{-j \cdot k \cdot r_S} / r_S) \cdot [\vec{S}] \cdot \vec{E}_i$  in modo da ottenere i coefficienti di scattering e, di conseguenza, la matrice RCS. E' da notare che, procedendo in questa maniera, il campo elettrico, valutato tramite il Ray-Tracing, è pesato dalla radice quadrata della densità dei raggi.

Si è, così, potuto integrare in modelli di propagazione deterministica una componente stocastica necessaria per stimare lo scattering non deterministico, cioè non semplicemente spiegabile con le leggi dell'Ottica Geometrica, partendo dall'approssimazione di piano tangente della superficie e dando una impostazione dichiaratamente statistica al problema.

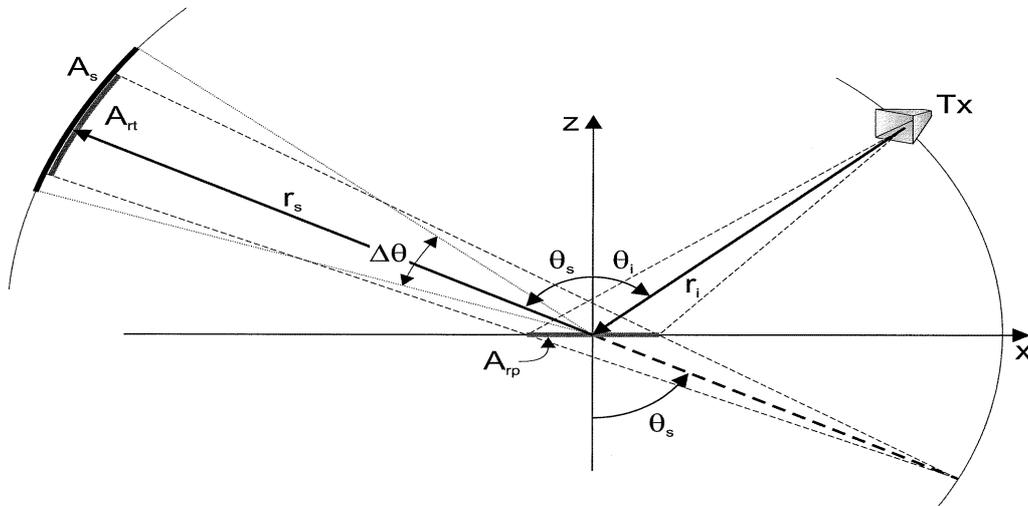


Fig. 2.8: Tubi di flusso dei raggi incidenti e diffusi;  $A_{rp}$  è il piano di scattering,  $A_s$  indica il piano di ricezione.

## **2.4 Modellazione della dispersione angolare dovuta allo scattering da superfici rugose per implementare strumenti di stima della propagazione fondati sul Ray-Tracing (M. Herben).**

Lo scopo è di modellare gli effetti dispersivi della propagazione, causati da superfici rugose in senso statistico, direttamente al ricevitore. Si procede assegnando una sorta di rugosità efficace statistica ad una superficie non liscia e piatta, con irregolarità dovute sia alla superficie che alla variabilità dei materiali di cui la superficie è costituita.

Fino a poco tempo fa, non si teneva conto degli effetti dispersivi della propagazione in presenza di superfici non piane e solo la riflessione speculare assumeva importanza. Ma, in effetti, gli studi più recenti mettono in chiara evidenza che la componente di riflessione, pur mantenendo assoluta importanza, mostra una dispersione angolare spiegabile solo in termini di scattering diffuso: ciò fa sì che un settore angolare costituito da raggi e centrato sulla direzione speculare giunga in ricezione e che le onde non abbiano più angoli di arrivo ben definiti in senso deterministico.

Il principio di Huygens costituisce un importante riferimento suggerendo che, ogniqualvolta un'onda piana incide su una superficie liscia, si genera un campo dovuto alla sorgenti secondarie lungo la superficie, ognuna delle quali con una sua fase a seconda della posizione. Certo, nella direzione speculare le onde secondarie generate dalla sorgenti superficiali interferiscono in modo costruttivo dato che la loro differenza di fase è  $\Delta\Psi=0$ . Tanto più ci si discosta dalla direzione speculare, l'interferenza distruttiva produce la cancellazione dei campi diffusi. A dire il vero, mentre una superficie piatta di estensione infinita riflette solo in direzione speculare, una superficie piatta di estensione limitata diffonde anche attorno alla direzione speculare.

Se, invece, si prende in considerazione una superficie rugosa, non sempre si ha interferenza costruttiva in direzione speculare ed interferenza distruttiva in tutte le altre direzioni poiché, ed è questo il fatto nuovo, la differenza di fase dipende decisamente anche dalla differenza dell'altezza  $\Delta h$  (scostamento dalle condizioni ideali) di superficie. Come conseguenza, si ha diffusione dell'energia anche in altre direzioni diverse da quella speculare. Contestualmente, proprio perché non tutte le sorgenti secondarie interferi-

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

scono sempre in modo costruttivo in direzione speculare, si assiste ad una diminuzione dell'intensità del campo medio riflesso speculare.

Se viene fatta l'ipotesi che le fasi delle sorgenti secondarie siano distribuite in modo uniforme, il campo speculare si annulla e si ha solo il cosiddetto campo diffuso od incoerente. Tuttavia, è più realistico pensare che le fasi siano distribuite casualmente ma non uniformemente ed in tal caso il campo mostra sia una componente coerente che incoerente. In questo contesto, anche una superficie piatta ma costituita da materiali diversi potrebbe generare fenomeni di dispersione angolare.

La linea guida del modello statistico, qui esaminato, consiste nell'attribuzione di una distribuzione efficace dell'altezza ad una superficie rugosa, eventualmente composta da diversi strati di materiali.

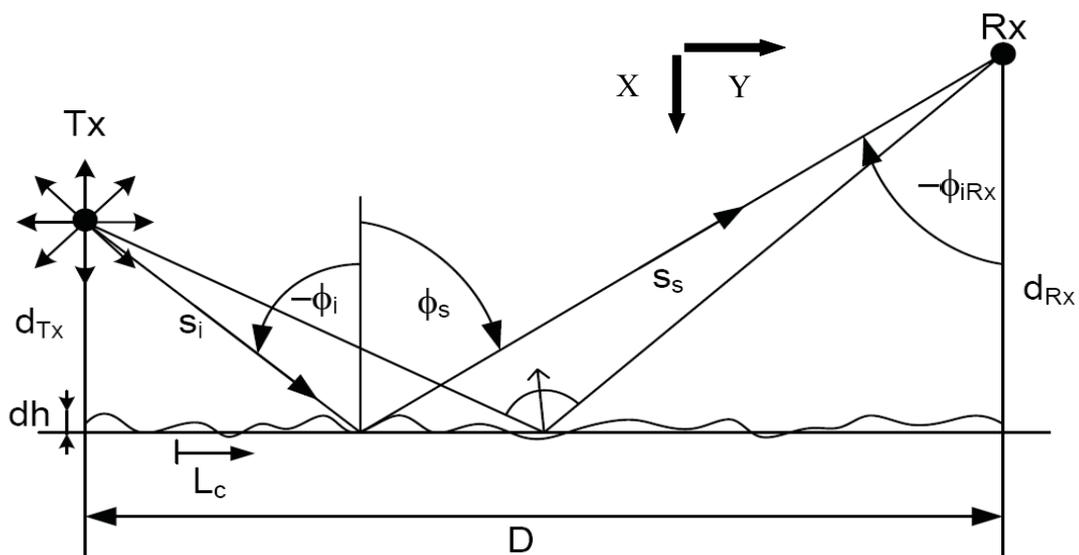


Fig. 2.9: Scenario del problema "Herben": trasmettitore ( $T_x$ ) e ricevitore ( $R_x$ ) ed una superficie rugosa tale che al ricevitore arrivano raggi da differenti direzioni.

L'approccio "Herben" è stocastico nel senso che modella gli effetti di scattering da superficie rugosa considerando un insieme ("facets") o array di elementi dei quali si conoscono le proprietà di scattering. La conoscenza della distribuzione di tali elementi permette di determinare l'effetto di scattering totale della parete di edificio esaminata.

Una superficie viene descritta dalla deviazione standard dell'altezza superficiale  $\sigma_h$  e dalla lunghezza di correlazione  $L_c$  indicativa della dipendenza statistica delle altez-

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

ze in due suoi punti diversi. Si ipotizza una distribuzione Gaussiana dell'altezza  $h$  con valore medio nullo e varianza  $\sigma_h^2$ :

$$P_h(h) = (1/\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_h) \cdot e^{-(1/2)(h/\sigma_h)^2} ; \text{ il coefficiente di autocorrelazione è invece:}$$

$$\rho_{hh'}(l) = e^{-(l/L_c)^2} \quad \text{Gaussiano come la distribuzione dell'altezza } h.$$

Detto ciò, usare l'approssimazione di piano tangente locale significa che la determinazione del campo in qualsiasi punto della superficie viene ricondotto al calcolo dello stesso come se l'onda fosse incidente sul piano locale tangente in quel punto. Lo scattering in direzione non speculare viene, in tal modo, stimato considerando le diverse inclinazioni ossia le differenti orientazioni dei piani tangenti nonché le altezze variabili nei punti di riflessione.

Indicate con  $s$  le pendenze della superficie, in un caso monodimensionale vale:

$s = \tan(\theta) = dh/dy$  ed essendo stata fatta l'ipotesi di distribuzione normale si ha pure distribuzione Gaussiana per le pendenze  $s$ , caratterizzate da una varianza  $\sigma_s^2$  funzione della varianza delle altezze e della lunghezza di correlazione come segue:

$$\sigma_s^2 = (2 \cdot \sigma_h^2) / L_c^2$$

La distribuzione delle pendenze è, quindi,  $P_s(S) = (1/\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_s) \cdot e^{-(1/2)(S/\sigma_s)^2}$ .

Se si considera un caso bidimensionale  $h=h(x,y)$ , allora,  $\sigma_{s_{x,y}}$  è interpretabile come un piano ad orientazione casuale avente le stesse proprietà statistiche della parete Gaussiana: una superficie distribuita in modo normale, descritta dall'altezza di superficie e dalla sua lunghezza di correlazione può, equivalentemente, essere caratterizzata tramite piani tangenti con una pendenza  $P_s(S)$  e altezza normali.

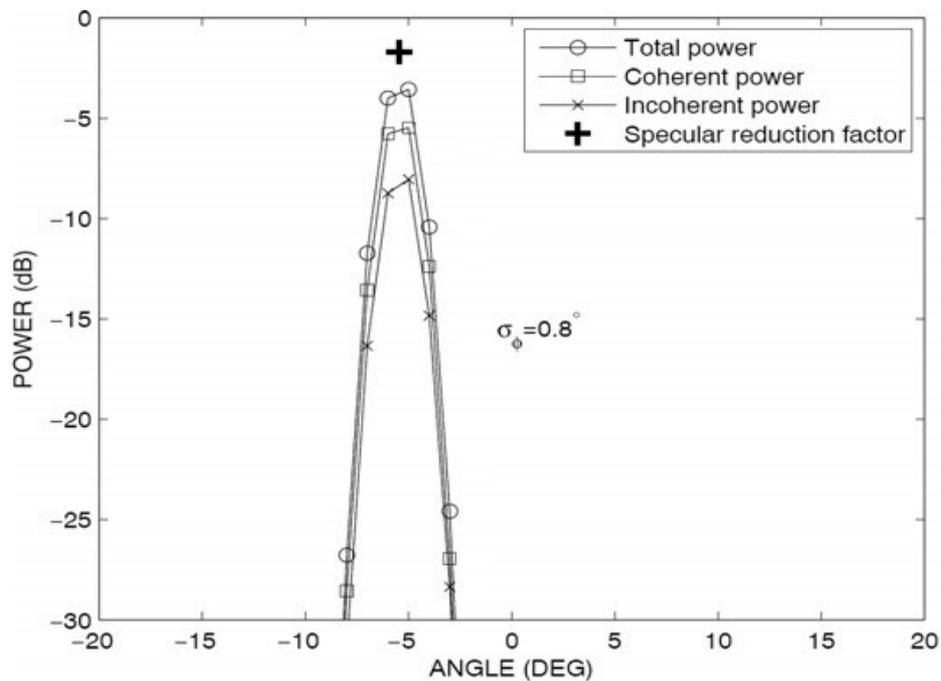
In sintesi, si caratterizza una superficie rugosa tramite una distribuzione di altezze e una lunghezza di correlazione  $e$ , poi, si trasforma quest'ultima in pendenze di piani tangenti: fin qui il metodo "Herben" si basa su un approccio analogo a quello "Wiesbeck". La differenza sostanziale è che, ora, si descrive la probabilità che un raggio giunga effettivamente al ricevitore invece di determinare tramite Ray-Tracing il numero di raggi in arrivo e la loro orientazione. Indubbiamente, ciò comporta un risparmio computazionale visto che il metodo "Wiesbeck" ricorre al Ray-Launching e alle simulazioni Monte Carlo, generando un numero molto alto di raggi. Proprio per questo motivo, come si era anticipato, si può anche affermare che la dispersione angolare viene modellata direttamente in ricezione invece di stimarla tramite la superficie di riflessione. Ne

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

consegue che il campo elettrico è pesato da una distribuzione di probabilità e non più dalla densità dei raggi nel punto di raccolta.

Il passo successivo della procedura qui illustrata consiste nell'adoperare la distribuzione delle pendenze degli elementi di superficie per ricavare la distribuzione per la direzione di riflessione dalla superficie  $P_{\phi_S}(\phi_S)$  e, infine, la distribuzione della probabilità relativa alla direzione delle onde in arrivo al ricevitore  $P_{\phi_{iRx}}$  (come si vede in figura 2.9). Dal momento che la funzione di distribuzione di probabilità della direzione delle onde in arrivo al ricevitore è nota al ricevitore stesso, si può ben dire che lo scattering è valutato direttamente in ricezione.

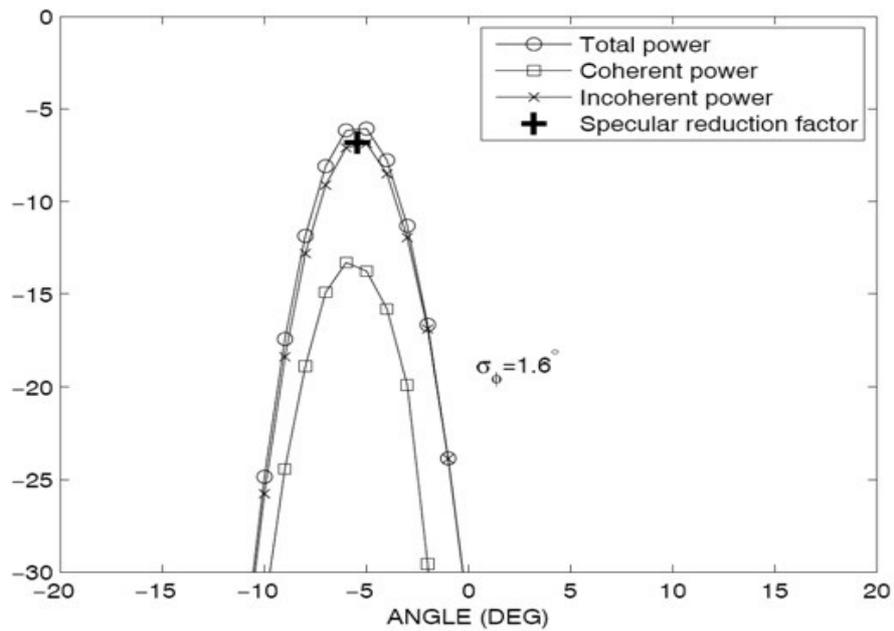
A corredo di quanto esposto, vengono presentati i risultati delle simulazioni in quattro diversi scenari: come si può vedere dai grafici seguenti sono presi in considerazione *setup* diversi di trasmettitore e ricevitore e diversi parametri di rugosità.



(a)

Fig. 2.10(a): Simulazioni della potenza ricevuta al variare dell'angolo di incidenza.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici



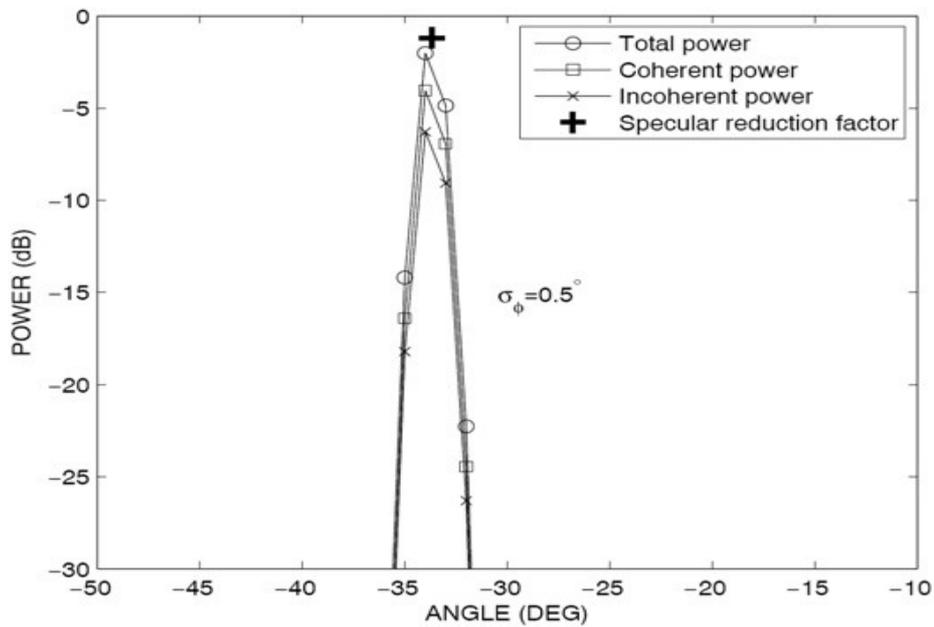
(b)

Fig. 2.10(b): Simulazioni della potenza ricevuta rispetto all'angolo di incidenza in ricezione. In (a)  $\sigma_h = 0.05\lambda$ , in (b)  $\sigma_h = 0.1\lambda$ .

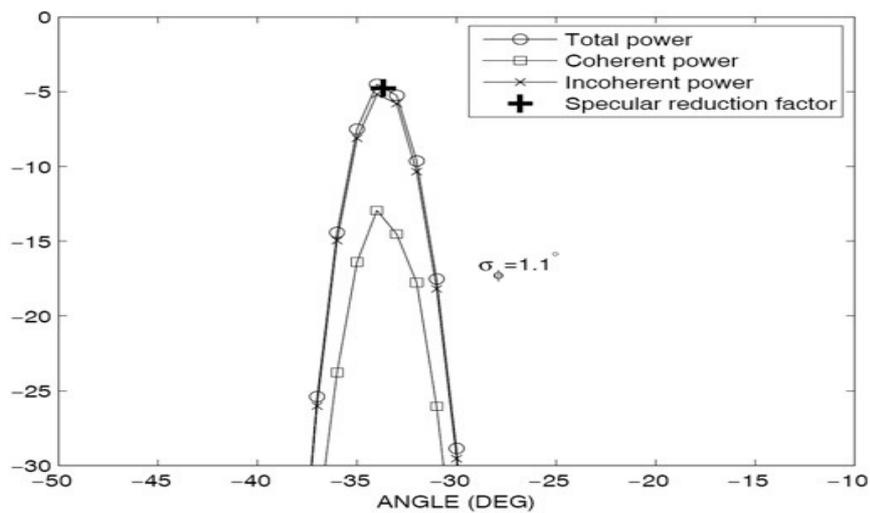


Fig. 2.11: Fotografia della facciata di edificio usata per le misure dal gruppo di lavoro del Professor M. Herben (Università di Eindhoven, "Technische Universiteit Eindhoven", Olanda)

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici



(a)



(b)

Fig. 2.12: Simulazioni della potenza ricevuta al variare dell'angolo di incidenza al ricevitore. In (a)  $\sigma_h = 0.05\lambda$ , in (b)  $\sigma_h = 0.1\lambda$ .

Sia per la figura 2.10 che per la figura 2.12 la dispersione angolare per la potenza totale è data da  $\sigma_\phi$ . I grafici della figura 2.10 sono validi per i seguenti dati espressi in

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

unità di lunghezza d'onda :  $dT_x=10$ ,  $dR_x=5$ ,  $D=10$ ,  $L_C=10$ ; invece, i dati di riferimento per la figura 2.12 sono:  $dT_x=100$ ,  $dR_x=5$ ,  $D=10$ ,  $L_C=10$ .

Si nota che la dispersione angolare raddoppia, raddoppiando la rugosità di superficie. Il diverso andamento riscontrato nelle due coppie di grafici si spiega col fatto che  $\sigma_h=0.05\lambda$  indica una superficie ragionevolmente liscia e, come tale, prevale la componente coerente del campo; al contrario,  $\sigma_h=0.1\lambda$  è valore tipico di una superficie sufficientemente rugosa ed a dominare è la componente incoerente dell'energia diffusa.

Viene, poi, osservato cosa accade alla dispersione angolare al variare della posizione del trasmettitore rispetto alla parete di scattering: spostando il punto di trasmissione più vicino alla parete, senza dubbio, aumenta la dispersione angolare.

Naturalmente, è possibile estendere ad un caso bidimensionale ogni tipo di considerazione fatta a proposito di una superficie in cui una sola dimensione è significativa. In tal caso, la rugosità può essere descritta dalle pendenze della superficie in due direzioni ortogonali  $x$  e  $y$ ; la differenza è che, ora, si deve usare una probabilità congiunta che, se le variabili sono indipendenti, assume la forma di:

$$P(\theta_{iRx}, \phi_{iRx}) = (P_{\theta_{iRx}}) \cdot (P_{\phi_{iRx}})$$

Al fine di avere maggiore flessibilità al mutare delle situazioni reali, la distribuzione delle altezze e delle inclinazioni dei piani tangenti possono essere assunte indipendenti l'una dall'altra e non avere necessariamente la configurazione della distribuzione Gaussiana.

Il fine ultimo della costruzione dei modelli analitici è la loro integrazione in un Ray-Tracer così da poter prevedere gli effetti dispersivi del fenomeno di scattering dovuto ad interazioni multiple che occorrono al segnale radio lungo il suo cammino. Per evitare di conferire al modello un eccessivo grado di complessità è preferibile tener conto dello scattering nel dominio angolare solo all'ultima interazione di un dato raggio in arrivo al ricevitore; in fin dei conti, il campo diffuso decade col quadrato delle distanze tra trasmettitore e parete e tra parete di scattering e ricevitore e, di conseguenza, solo l'ultima interazione è importante.

Nelle simulazioni, qui, non si tiene conto della estensione limitata della parete di scattering; pur tuttavia, nelle misure si nota un decremento della dispersione angolare.

## 2.5 Un modello a rugosità efficace per lo scattering distribuito "forward" e "backward" da pareti di edifici (V. Degli Esposti).

Una campagna di misure ha permesso di costruire e calibrare un modello di scattering diffuso fondato sul concetto di rugosità efficace da integrare, poi, in un simulatore a Ray-Tracing. E' bene sottolineare che lo scattering diffuso ha origine dalla presenza di disomogeneità ed irregolarità nella parete di un edificio che provocano diffusione del segnale anche in direzione non speculare.

La densità di potenza associata all'onda diffusa è proporzionale al quadrato della intensità del campo  $(|\vec{E}_s|)^2 = |\vec{E}_s(r_s, \theta_s, \phi_s)|^2$  determinata tramite l'uso di un opportuno coefficiente di scattering S e di un appropriato diagramma di radiazione, corrispondenti ad una ipotesi sul modo di diffondere energia da parte delle irregolarità sia superficiali che di volume della parete in questione. La figura 2.13 descrive il sistema di riferimento adottato.

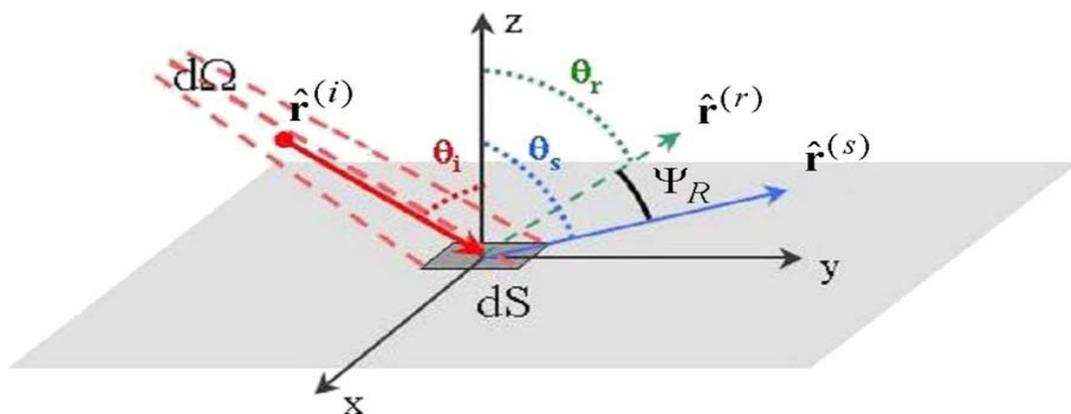


Fig. 2.13: Elemento di superficie che produce riflessione ma anche scattering diffuso.

Si possono adottare diversi tipi di diagrammi di scattering a seconda della parete e, quindi, della diversa modalità di diffusione ipotizzata.

Il modello più semplice è quello Lambertiano: l'andamento è cosinusoidale e il lobo di radiazione ha il suo massimo sempre nella direzione perpendicolare alla parete che risulta essere la direzione privilegiata di reirradiazione.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

Da un punto di vista analitico si può esprimere l'intensità del campo diffuso come segue:  $E_S = E_{S0} \cdot \sqrt{\cos(\theta_S)}$  ,  $E_S = (SK / r_i \cdot r_s) \cdot \sqrt{(dS \cdot \cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_s) / \pi)}$  .

L'inconveniente è che il diagramma di scattering Lambertiano prescinde dalla direzione di incidenza e, quindi, è più realistico usare un diagramma di radiazione che presenti un lobo di diffusione orientato in direzione speculare e non tanto in direzione normale alla parete. Si parla, allora, di modello direttivo a singolo lobo:

$|E_S|^2 = E_{S0}^2 \cdot ((1 + \cos(\psi_R)) / 2)^{\alpha_R}$  dove  $\psi_R$  è l'angolo tra la direzione dell'onda riflessa e la direzione di scattering; parametro importante di modellazione è  $\alpha_R$  che si riferisce alla larghezza del lobo di diffusione. Infatti all'aumentare di  $\alpha_R$ , il lobo diviene più stretto ossia più direttivo.

In presenza di elementi architettonici sporgenti come balconi o colonne e in condizioni di incidenza radente, lo scattering si verifica oltre che nella direzione speculare anche nella stessa direzione di incidenza: si aggiunge al modello precedente un lobo orientato nella direzione di incidenza in modo tale da tener conto del fenomeno chiamato backscattering. L'espressione analitica del modello a doppio lobo o *backscattering lobe* risulta essere:

$|\vec{E}_S|^2 = E_{S0}^2 \cdot [\Lambda \cdot ((1 + \cos(\psi_R)) / 2)^{\alpha_R} + (1 - \Lambda) \cdot ((1 + \cos(\psi_i)) / 2)^{\alpha_i}]$  in cui  $\alpha_i, \alpha_R = 1 \dots N$ ;  $\Lambda$  assume valori compresi tra 0 e 1 e serve a modulare il "peso" rispettivo dei due lobi ed appare chiaro che per  $\Lambda=1$  ci si riconduce al modello direttivo a singolo lobo.

Come detto in precedenza, il punto di partenza è costituito da misurazioni, eseguite su tre differenti tipologie di pareti di edificio: una parete liscia metallica, una parete di mattoni ragionevolmente uniforme e, infine, una parete in mattoni tipica di una costruzione rurale con elementi quali, per esempio, finestre. Il fatto fondamentale che emerge è che adottando il modello direttivo a singolo lobo si trova il migliore accordo delle simulazioni con le misure e, in tale contesto, i valori più credibili sono  $\alpha_R = 3$  oppure 4.

Fin qui si è illustrato il significato nonché l'importanza di scegliere un realistico diagramma di scattering, ma anche il coefficiente di scattering S deve essere definito e associato, al pari del fattore di Rayleigh R che tiene conto della perdita di potenza nella direzione di riflessione speculare, ad una specifica parete di edificio. Se  $\Gamma$  è il coefficiente di riflessione di Fresnel per una superficie liscia, allora  $(\Gamma * R)$  è il vero

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

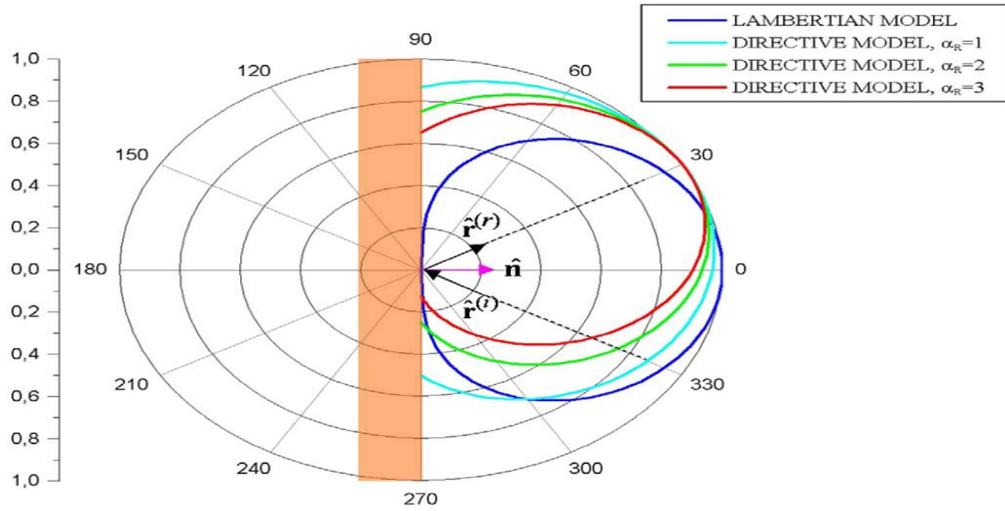


Fig. 2.14: Confronto del diagramma di scattering Lambertiano e direttivo a singolo lobo.

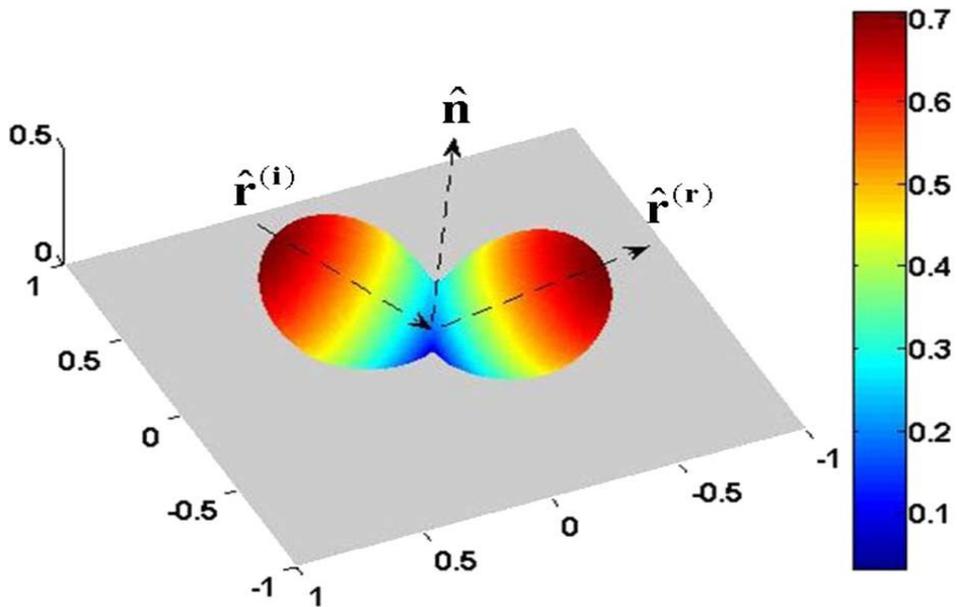


Fig. 2.15: Diagramma 3-D del modello di scattering a doppio lobo, per  $\alpha_I = \alpha_R = 10$ ,  $A = 0.5$  e  $\vartheta_i = \pi/4$ .

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

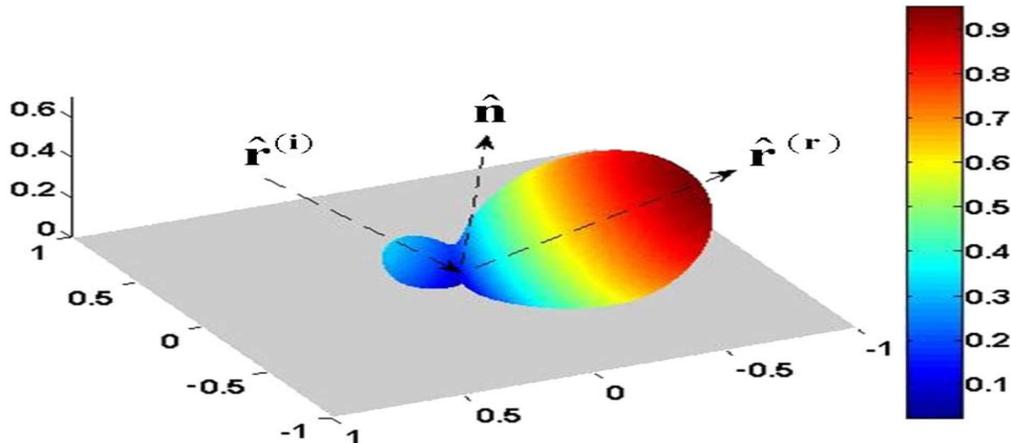


Fig. 2.16: Diagramma 3-D del modello a doppio lobo, per  $\alpha_I = \alpha_R = 10$ ,  $A = 0.9$  e  $\vartheta_i = \pi/4$ .

coefficiente di riflessione per superfici rugose, irregolari ( $0 < R < 1$ ).

Il coefficiente di scattering  $S$  può essere definito, almeno in prima istanza, come il rapporto nel punto di incidenza tra l'ampiezza del campo diffuso e quella del campo incidente:  $S = E_s(P) / E_i(P)$  e, quindi,  $S^2$  rappresenta la percentuale di potenza incidente sull'elemento di superficie, con centro in un punto della parete, che viene diffusa in tutte le direzioni.

Eppure, una definizione più corretta del coefficiente di scattering deve basarsi sulla considerazione che la potenza di scattering è, a ben guardare, una frazione della potenza riflessa piuttosto che di quella incidente. Un suggerimento in tale direzione è dato dall'esame del bilancio di potenza totale (si veda Fig. 2.13) relativo all'elemento di superficie infinitesimo  $dS$ .

E' possibile trovare una relazione che esprima il fattore di Rayleigh  $R$ , contenuto nella formulazione della potenza riflessa, in funzione di  $S$ , proprio a partire dalla constatazione che il contributo diffuso è prodotto a discapito della potenza riflessa e di quella che penetra attraverso la parete:

$$E_i^2 \cdot \Delta \Omega \cdot r_i^2 = |\Gamma|^2 \cdot R^2 \cdot E_i^2 \cdot \Delta \Omega \cdot r_i^2 + S^2 \cdot E_i^2 \cdot \Delta \Omega \cdot r_i^2 + 2 \cdot \eta \cdot P_p$$

in cui  $\Delta \Omega$  rappresenta l'angolo solido relativo all'elemento di superficie su cui incide l'onda e  $\eta$  è l'impedenza intrinseca del vuoto; se si dividono tutti i termini per quello al primo membro dell'equazione sopra scritta, si ricava:

$$1 = |\Gamma|^2 \cdot R^2 + S^2 + P_p / P_i \quad .$$

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

L'ultimo termine rappresenta il rapporto tra la potenza trasmessa alla parete e la potenza che incide sulla parete e lo si può ritenere dipendente solo dalle caratteristiche della parete e non dal coefficiente di scattering S. All'aumentare di S si registra una parallela diminuzione di R e, con essa, del contributo riflesso in direzione speculare.

Se si confronta il bilancio di potenza ricavato in condizioni generali con quello relativo al caso specifico di una parete liscia ed omogenea (R=1, S=0), tramite semplici manipolazioni algebriche, si ottiene la relazione cercata:

$R = \sqrt{1 - (S^2/|\Gamma|^2)}$  che spiega la ragione per cui la definizione di S non è conveniente: volendo per ogni parete assumere un valore unico, costante del coefficiente di scattering, indipendente dalla direzione di incidenza e compreso nell'intervallo [0,1], la presenza del coefficiente di riflessione di Fresnel, che invece dipende dalla direzione di incidenza, lo impedisce. Infatti, il valore di S non può superare il più piccolo dei valori ammissibili per  $\Gamma$ .

A questo punto, appare più opportuno definire il coefficiente di scattering come il rapporto tra l'ampiezza del campo diffuso e l'ampiezza del campo riflesso, relativamente al punto di incidenza, e, così facendo,  $S^2$  risulta essere la percentuale di potenza diffusa a spese solo di quella riflessa:

$$S = E_s(P)/E_r(P)$$

In ragione di questa nuova definizione, rispetto a quanto fatto in precedenza, bisogna effettuare un cambiamento nel calcolo dell'ampiezza del campo diffuso: il contributo di potenza diffuso non sarà più  $S^2 \cdot E_i^2 \cdot \Delta\Omega \cdot r_i^2$  ma  $S^2 \cdot E_r^2 \cdot \Delta\Omega \cdot r_i^2$  cioè, considerando la relazione tra  $E_r$  ed  $E_i$ ,  $S^2 \cdot |\Gamma|^2 \cdot E_i^2 \cdot \Delta\Omega \cdot r_i^2$ . Dopo alcuni passaggi matematici, in analogia con quanto fatto prima, si ottiene:  $R = \sqrt{1 - S^2}$ .

Con la nuova definizione di S, sia il coefficiente di scattering che il fattore R non dipendono dalla direzione di incidenza e per ogni tipologia di parete possono essere assunti costanti nell'intervallo [0,1] tenendo conto solo del tipo di parete.

Le simulazioni sono state confrontate con le misure ed appare chiaro che S=0.3 o S=0.4 (costruzione rurale) sono valori ragionevoli per riassumere una molteplicità di situazioni reali diverse. A proposito del parametro, di cui s'è detto,  $\alpha_R$ , si può precisare, con maggiore dettaglio, che  $\alpha_R = 4$  risulta essere il valore più appropriato, cioè, che si adatta meglio alle misure, nel caso di parete levigata metallica mentre  $\alpha_R = 3$  è il valore più realistico per pareti in mattoni di un edificio rurale. La spiegazione della differenza

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

di valori si ha considerando che la costruzione rurale ha un gran numero di irregolarità e ciò causa una riduzione in termini di direttività del diagramma di scattering.

In sintesi, si è partiti dalle misure in modo da calcolare il diagramma di scattering, in regione di campo lontano, per diverse tipologie di pareti di edificio; tali misure devono guidare nella costruzione di modelli analitici di scattering diffuso da integrare in strumenti software di simulazione (Ray-Tracing). Il passo finale consiste nel confronto delle misure con le simulazioni che devono raccordarsi tra loro a conferma della validità dell'impianto analitico adottato. In tale contesto, non può certo sorprendere la via statistica adottata dal momento che è improponibile considerare con esattezza le effettive irregolarità di ogni singola parete ed è, invece, più semplice associare ad ogni parete una sorta di rugosità efficace, parametro che tiene conto non solo della reale rugosità di superficie ma che riassume in senso statistico tutte le irregolarità e non idealità della parete stessa.

Per migliorare l'accuratezza di previsione del diagramma di scattering si può, nel caso di ambienti *indoor*, estendere il modello a rugosità efficace. Infatti, nel caso di pareti all'interno di edifici non solo lo scattering diffuso all'indietro (backward) ma anche quello nel semispazio posto oltre la parete (forward) deve essere tenuto in conto dato che è ragionevole pensare che i terminali radio siano posti in stanze differenti dell'edificio.

L'idea guida è che, analogamente a quanto succede con la potenza riflessa, la potenza *forward-diffuse* ("potenza diffusa in avanti") sia generata a discapito della potenza trasmessa; come la potenza diffusa all'indietro è generata a spese della potenza riflessa, così, la potenza diffusa in avanti vien prodotta a spese della potenza trasmessa. Come prima si teneva conto della diminuzione della potenza riflessa specularmente tramite il fattore di riduzione ( $\Gamma \cdot R$ ), ora, si considera un fattore di trasmissione attenuato.

Per il "modello esteso a rugosità efficace" si prende in considerazione la Fig. 2.17 che illustra l'aggiunta di angoli e versori tali da poter descrivere in maniera analitica lo scattering diffuso anche nel semispazio posto al di là della parete su cui incide l'onda radio: compare l'angolo  $\psi_i$  tra  $\hat{r}_s$  e  $\hat{r}_i$  e l'angolo  $\psi_b$  tra  $\hat{r}_s$  e  $\hat{r}_b$ .

Si possono scrivere le seguenti due relazioni a riassumere quanto esposto:

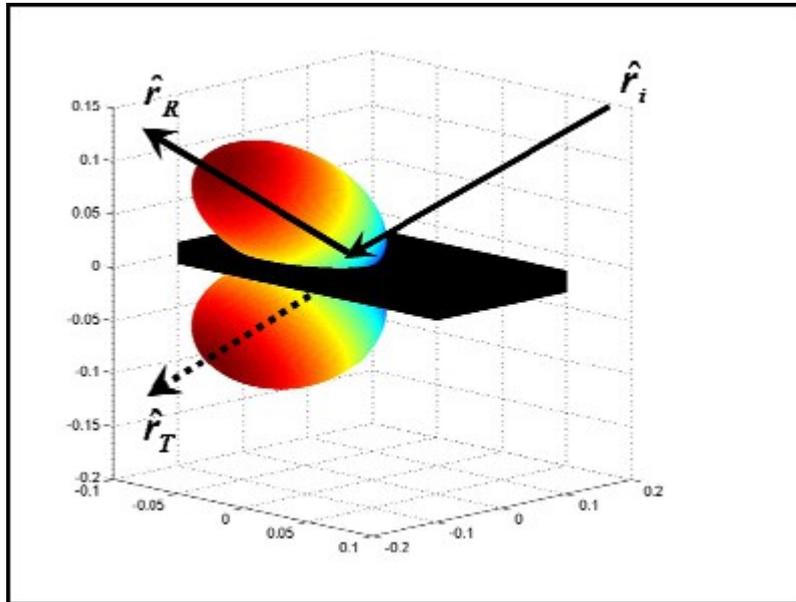
$$P_{scattered\ backward} = S_R^2 \cdot P_R = S_R^2 \cdot |\Gamma|^2 \cdot (|E_i|^2 / 2\eta) \cdot d\Omega \cdot r_i^2$$

$$P_{scattered\ forward} = S_T^2 \cdot P_T = S_T^2 \cdot |\tau|^2 \cdot (|E_i|^2 / 2\eta) \cdot d\Omega \cdot r_i^2$$



## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

scattering totale misurato con quanto riprodotto tramite un Ray-Tracing, in cui è stato incluso il modello esteso a rugosità efficace.



*Fig. 2.18: Esempio di diagramma di scattering diffuso relativo ad un elemento di parete indoor nel caso simmetrico di modello a singolo lobo.*

Nel corso delle simulazioni RT vengono opportunamente provate diverse combinazioni dei parametri statistici di rugosità e si deduce che, nel caso dei valori migliori nel senso dell'approssimazione ai minimi quadrati, il "forward scattering" è indubbiamente rilevante ( $S_T=0.5$ ,  $\alpha_T=3$ ); al contrario, il "backward scattering" risulta essere di intensità bassa e direttivo ( $S_R=0.1$ ,  $\alpha_R=8$ ), probabilmente perché è stata usata una parete intonacata e, come tale, presumibilmente liscia. Il fatto interessante è che la precedente osservazione vale per una polarizzazione orizzontale mentre adottando una polarizzazione verticale sia il backward che il forward scattering sono di esigua intensità: la struttura interna della parete si comporta in modo diverso a seconda della polarizzazione.

Nella trattazione fin qui svolta si è accompagnato il sostantivo scattering con l'attributo diffuso. Il motivo è che lo scattering è un fenomeno di per sé diffuso perché ogni singola "mattonella" elementare della parete produce un effetto di scattering avvertibile in ricezione.

Si pone la necessità di ricavare un modello analitico capace di fornire la dispersione angolare della potenza diffusa ("power-angle profile") dovuta all'intera parete di

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

scattering senza essere costretti a spendere grandi risorse di calcolo discretizzando la parete in un numero alto di mattonelle elementari, per ognuna delle quali deve essere stimato il contributo diffusivo.

In altri termini, conoscere il campo infinitesimo generato da ogni singolo elemento  $dS$  è, di certo, importante ma non sufficiente perché si ha interesse a conoscere il campo totale prodotto dalla parete nella sua interezza in un punto dello spazio in cui viene posizionata l'antenna ricevente. Contestualmente, si vuole avere comprensione della distribuzione angolare del campo totale, così come la sua distribuzione temporale.

Il primo passo consiste nel determinare una relazione che esprima il campo dovuto ad un elemento infinitesimo di superficie della parete, vale a dire, una formulazione analitica, la più semplice possibile, del contributo elementare del campo diffuso, da inserire, poi, in uno strumento software di previsione e simulazione. Tale formulazione cambia a seconda della specifica tipologia di parete e del modello di diagramma di scattering adottato, cioè dipende dall'ipotesi fatta sulla modalità di diffusione della parete e, quindi, dalle caratteristiche della parete stessa.

Il passo seguente consta nel riunire tutti i singoli contributi di campo elementare ossia considerare separatamente ogni singola mattonella, calcolarne il contributo e, poi, sommare il tutto al fine di ottenere l'effetto complessivo generato dalla parete.

In termini matematici, si deve effettuare una integrazione di tutti i termini infinitesimi. Se si desidera calcolare la distribuzione temporale del campo totale diffuso e, nell'ipotesi semplificativa che  $x$  sia la sola coordinata significativa dell'elemento di superficie, allora, per ottenere la potenza totale di scattering è necessario integrare l'equazione del campo elementare rispetto a  $x$ . Si tratta di ricavare il ritardo di propagazione in funzione di  $x$ , di invertire tale relazione per avere  $x$  in funzione del tempo  $t$ , e, infine, di sostituire quanto trovato nell'espressione del campo.

L'operazione di integrazione ci permette di fare una stima della distribuzione temporale del campo totale passando attraverso la valutazione di ogni elemento infinitesimo  $dx$  proprio perché  $x$  risulta essere espresso in funzione del tempo.

La stessa procedura viene seguita nel caso si voglia conoscere la distribuzione angolare del campo diffuso; l'unica differenza è che al posto del tempo  $t$  compare, ora, l'angolo di arrivo al ricevitore. E' chiaro che in tal caso, l'integrazione deve essere eseguita sulla variabile  $x$  espressa in funzione dell'angolo di arrivo.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

Alla luce di quanto detto, è pienamente comprensibile l'importanza di un modello analitico che permetta di calcolare in forma chiusa la dispersione angolare attorno alla direzione speculare prodotta in ricezione dallo scattering diffuso ad opera di una parete rugosa, cioè esprimere un profilo di potenza rispetto al tempo o all'angolo di arrivo in forma continua e non considerando un insieme discreto di raggi.

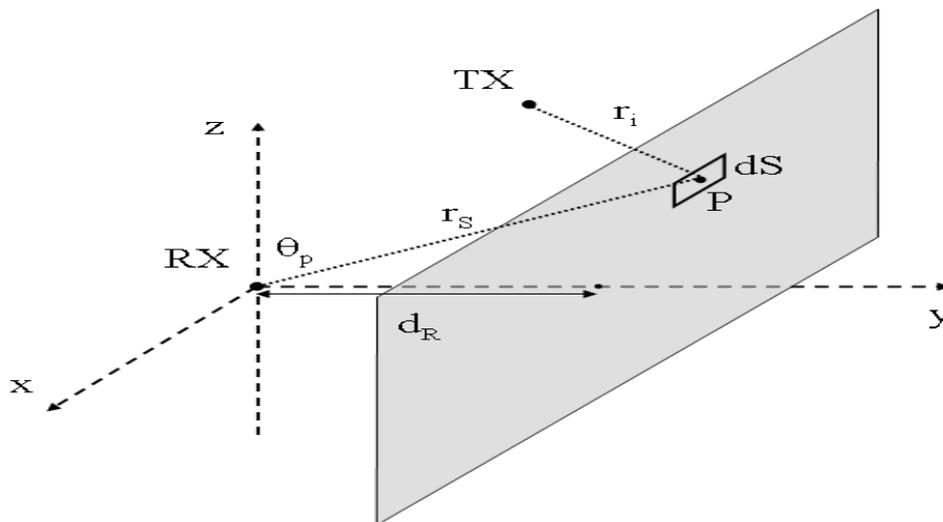


Fig. 2.19: Impostazione del problema del calcolo della distribuzione angolare di potenza per una parete tridimensionale.

Viene qui fatto riferimento alla figura sopra riportata e al caso più semplice del modello Lambertiano per il calcolo della distribuzione angolare di potenza in forma chiusa:

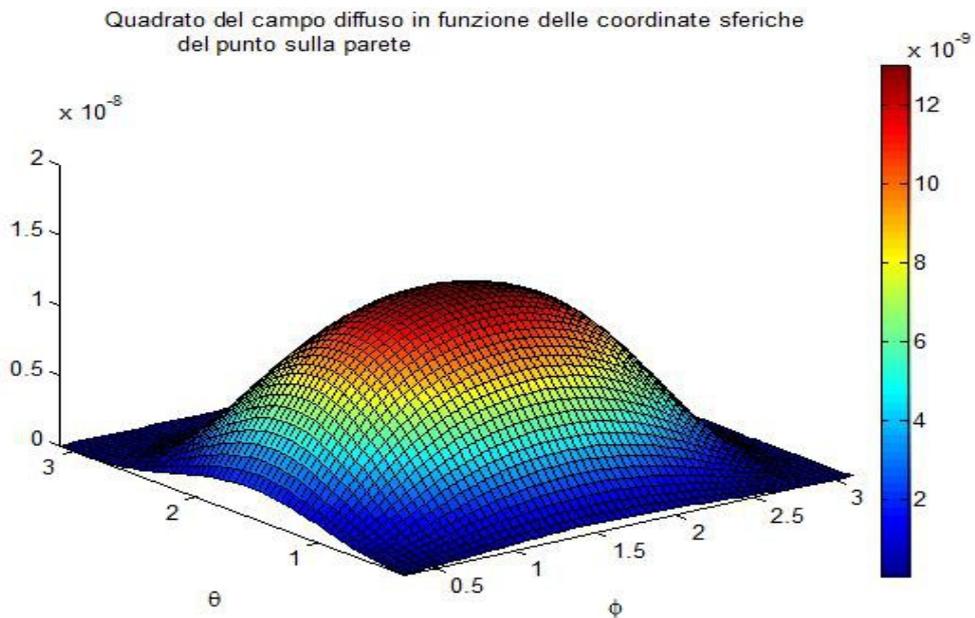
$$|\vec{E}_S|^2 = (K \cdot S \cdot \cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_s) \cdot dS) / (\pi \cdot (r_i \cdot r_s)^2)$$

I termini dipendenti dalla posizione dell'elemento di superficie ( $\cos \theta_i$ ,  $\cos \theta_s$ ,  $r_i$ ,  $r_s$ ,  $dS$ ) devono essere espressi in funzione delle coordinate dell'antenna trasmittente e del valore  $d_R$ , valori che si suppongono noti, e in funzione delle coordinate sferiche del punto P, centro dell'elemento di superficie. Una volta calcolata la distribuzione dell'intensità del campo, la distribuzione angolare di potenza viene ricavata pesando col guadagno dell'antenna ricevente  $|E_S(\theta_P, \phi_P)|^2$ .

E' bene precisare che, in tale contesto, è presa in considerazione una parete illimitata, disposta perpendicolarmente all'asse Y ad una distanza  $d_R > 0$  dall'origine, cioè dal ricevitore. Si assume che il trasmettitore TX abbia coordinate cartesiane  $x_T$ ,  $y_T$ ,  $z_T$  e, ovviamente,  $y_T < d_R$ . Dato che la parete è illimitata si può pensare che  $0 < \theta_P < \pi$  e anche

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

$0 < \phi_P < \pi$ ; il generico punto P è individuato da una terna di coordinate cartesiane  $(x_P, y_P, z_P)$  o, in maniera analoga, da coordinate sferiche  $\theta_P, \phi_P, r_P = r_S$ . L'angolo tra il versore normale alla superficie, il cui verso è dalla superficie al ricevitore, ed il versore diretto anch'esso dal punto P al ricevitore è chiamato  $\theta_S$ ; analogamente, si definisce l'angolo  $\theta_i$  tra il versore normale alla parete, che punta verso il ricevitore, ed il versore diretto da P al trasmettitore TX.



*Fig. 2.20: Distribuzione angolare di potenza prodotta da scattering relativo ad una parete di estensione infinita.*

Nella figura sopra illustrata viene riportato un esempio di distribuzione angolare di potenza ottenuta in forma chiusa con la procedura esposta relativamente ad una parete di estensione infinita; i dati di riferimento sono  $TX=(0,-20,0)$ ,  $d_R=20$ ,  $S=0.3$ .

La procedura può essere estesa ad una parete di dimensione finita e, come conseguenza, la distribuzione di potenza risulta "tagliata" per adattarsi alla reale dimensione della superficie di scattering. In particolare, il passaggio da una parete infinita ad una parete finita richiede che alcuni vincoli geometrici vengano inseriti nella formulazione analitica. Ecco, allora, che deve valere:

$$x_{MIN} \leq x_P \leq x_{MAX} \quad , \quad z_{MIN} \leq z_P \leq z_{MAX} \quad , \quad \phi_{MIN} \leq \phi_P \leq \phi_{MAX} \quad , \\ \theta_{MIN}(\phi_P) \leq \theta_P \leq \theta_{MAX}(\phi_P) \quad .$$

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

A questo punto, è fondamentale contrapporre il concetto di scattering distribuito, tipico di questo modo di procedere e calcolato in forma chiusa, all'idea di scattering concentrato che incentra, invece, l'attenzione su di un solo punto di scattering, posto al centro della parete di edificio. Dalle simulazioni si può constatare che lo scattering distribuito in forma chiusa offre il vantaggio di un migliore accordo con le misure al costo di un leggero incremento dei tempi di calcolo.

Possedere una formulazione analitica abbastanza semplice e capace di descrivere l'andamento della potenza diffusa da una parete rugosa nel dominio angolare significa, anche e soprattutto prevedere, in un contesto di propagazione caratterizzata da cammini multipli, la dispersione angolare attorno alla direzione speculare: è quella che viene chiamata "dense multipath component" responsabile dell'allargamento angolare attorno alle direzioni previste nel caso di incidenza dell'onda elettromagnetica su una superficie piatta, omogenea, ragionevolmente priva di irregolarità.

Al fine di evitare di trascurare fenomeni propagativi importanti, in modo particolare in ambito urbano, e di incorrere in una sottovalutazione della potenza trasportata dalle onde radio è fondamentale tenere nella massima considerazione la dispersione angolare, tipica dello scattering diffuso, e disporre di modelli analitici semplici da implementare in strumenti software a Ray-Tracing.

La connotazione statistica del modello in esame è evidente dal momento che a partire da una campagna di misure si colgono i suggerimenti per costruire formulazioni analitiche contenenti pochi parametri di scattering da modulare allo scopo di rappresentare diverse tipologie di pareti di edifici: associare ad ogni parete un coefficiente di scattering  $S$  e usare un certo diagramma di scattering significa fare un'ipotesi sulla reale modalità di diffusione della specifica tipologia di parete presa in esame.

### **2.6 Altri modelli di riflessione. Differenza tra l'approccio basato sull'Ottica Geometrica e l'approccio basato sull'Ottica Fisica.**

Si ritiene utile presentare altri due modelli capaci di dare spiegazione della riflessione diffusa a chiarimento ed approfondimento dei modelli discussi nei paragrafi precedenti.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

Esistono due approcci nello studio della riflessione: l'Ottica Geometrica e l'Ottica Fisica. I modelli geometrici sono approssimazioni dei modelli fisici in quanto sono applicabili solo se la lunghezza d'onda incidente è piccola rispetto alla dimensione delle irregolarità tipiche della superficie riflettente; tali modelli sono, però, esprimibili in una forma matematica semplificata al confronto dei modelli fisici e ciò costituisce un punto a loro favore.

L'approccio di Ottica Fisica si basa sulla teoria delle onde elettromagnetiche per risolvere il problema della riflessione da superfici rugose ed è, come tale, molto rigorosa; tuttavia, considerato che è molto difficile trovare una soluzione in forma chiusa al problema, anch'essa, al pari dei modelli di riflessione geometrica, deve fare uso di ipotesi semplificative relative alle proprietà della superficie (conduttore perfetto).

In questo contesto, il modello di Ottica Fisica Beckmann-Spizzichino e il modello di Ottica Geometrica Torrance-Sparrow offrono lo spunto per formalizzare vari aspetti già visti nei modelli illustrati. Per la verità questi due modelli si riferiscono al caso della riflessione di luce monocromatica da superfici sia lisce che rugose ma la loro importanza concettuale può essere estesa ad un caso generale di onda elettromagnetica.

Il modo in cui la luce è riflessa da una superficie dipende anche dalla struttura microscopica della superficie stessa. Per poter studiare la riflessione dell'onda incidente si deve avere conoscenza della struttura microscopica della parete riflettente e, di conseguenza, si pone la necessità di avere un modello analitico della superficie. Come si è più volte sottolineato nella trattazione dei modelli precedenti, non potendo conoscere con esattezza il profilo della superficie si procede ad una descrizione per via statistica; la superficie risulta descritta tramite una distribuzione di probabilità della sua altezza o della sua pendenza rispetto ad un prefissato valore di riferimento.

Nel caso si adotti un modello di distribuzione dell'altezza, la superficie risulta descritta dalla distribuzione statistica dell'altezza  $h$ , funzione aleatoria delle coordinate di superficie  $(x,y)$ . Con l'ipotesi di distribuzione normale a valore medio nullo e deviazione standard  $\sigma_h$ , che rappresenta la rugosità di superficie si ha:

$$P_h(h) = (1/(\sqrt{2\pi}\cdot\sigma_h)) \cdot e^{-h^2/2\sigma_h^2} .$$

Bisogna, però, aggiungere anche un parametro che ci dia informazioni sulla distanza tra i punti della superficie: il coefficiente di autocorrelazione  $C(\tau)$  che dà indicazione della maggiore o minore dipendenza tra i valori casuali assunti dall'altezza in due punti  $(x_1,y_1)$  e  $(x_2,y_2)$  ad una distanza  $\tau$ :  $C(\tau) = e^{-\tau^2/L^2}$ , dove  $L$  è la distanza di correla-

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

zione alla quale il coefficiente decade al valore  $e^{-1}$ . Appare chiaro che modulando questi due parametri cambia la configurazione della superficie.

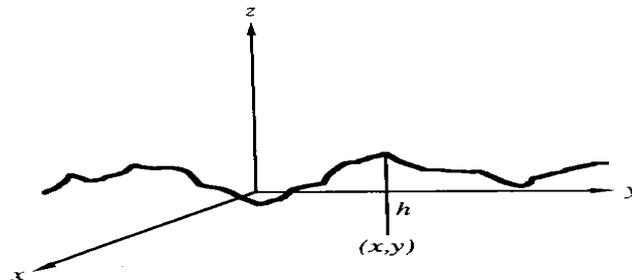


Fig. 2.21: Altezza di superficie intesa come una funzione aleatoria delle coordinate spaziali.

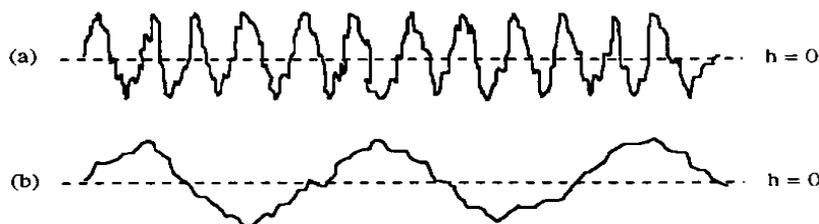


Fig. 2.22: Superficie trattata in modo statistico con (a) piccola e (b) grande distanza di correlazione.

Spesso risulta più comodo pensare ad una superficie come ad un insieme di micro faccette planari. Un gran numero di tali micro faccette costituisce una "mattonella" elementare di superficie. Si individua un vettore globale o principale normale alla superficie della singola mattonella mentre ogni micro faccetta ha un proprio vettore locale normale che può discostarsi dalla normale principale di un angolo  $\alpha$ : è proprio  $\alpha$  la misura della pendenza della micro faccetta e il profilo della superficie viene modellato considerando  $\alpha$  una variabile aleatoria. Anche in tal caso si può supporre che la distribuzione di probabilità della pendenza sia Gaussiana con valore medio nullo e deviazione standard  $\sigma_\alpha$ . All'aumentare della rugosità di superficie, si incrementa il valore della deviazione standard. Da notare che, rispetto al modello della distribuzione dell'altezza, ora, si ha a disposizione un solo parametro con cui modellare la superficie.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

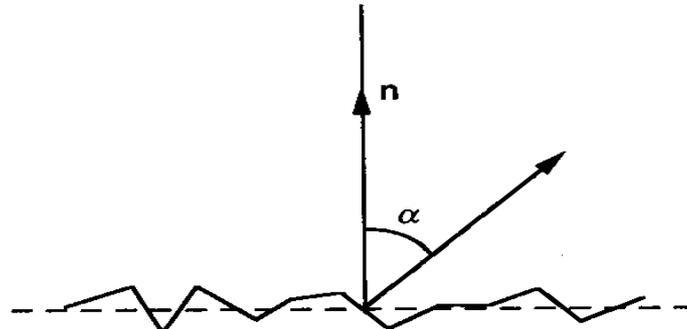


Fig. 2.23: Superficie modellata come un insieme di micro faccette planari.

Una volta dato il modello di superficie, si passa a considerare i due modelli di riflessione di cui si è in precedenza fatta menzione.

Il modello Beckmann-Spizzichino è basato direttamente sulla teoria delle onde elettromagnetiche ed è, quindi, derivato dalla risoluzione delle equazioni di Maxwell con il corredo di condizioni al contorno imposte dalla superficie riflettente; esso vale sia per superfici lisce che rugose.

Il campo sulla superficie può essere calcolato risolvendo l'equazione delle onde:

$$\nabla^2(\vec{E}) + k^2 \cdot \vec{E} = 0 \quad \text{sulla superficie } S \text{ con le opportune condizioni al contorno.}$$

Dall'uso del primo e secondo teorema di Green si giunge all'equazione integrale di Helmholtz:  $E_{ricezione}(P) = (1/4\pi) \cdot \iint [(E)_{Superf} \cdot (\partial \psi / \partial n) - \psi \cdot (\partial E / \partial n)_{Superf}] \cdot dS$ , con  $\psi = e^{jkR} / R$ , il cui significato è spiegato dalla figura 2.24 di seguito riportata.

Essa fornisce la soluzione dell'equazione delle onde in qualsiasi punto dentro una regione racchiusa dalla superficie  $S$  e che non contiene il punto di osservazione  $P$ ; la soluzione è data in termini di valori della funzione (campo di superficie) e della sua derivata rispetto alla normale sul confine (la superficie  $S$ ) della regione. Così, l'intensità dell'onda riflessa viene calcolata tramite il campo di superficie  $(E)_{Superf}$  che dipende dalle correnti di superficie indotte.

A questo punto, si adopera l'ipotesi di Kirchhoff secondo cui il campo in un punto della superficie è uguale a quello che sarebbe presente su piano tangente in quel punto. Sotto tale condizione vale:  $(E)_{Superf} = (1+F) \cdot E_{incidente}$ , dove  $F$  è il coefficiente di riflessione di Fresnel.

Siccome nell'espressione del campo è presente la funzione dell'altezza  $h(x,y)$ , il cui profilo non è noto, si è usato il modello stocastico di distribuzione dell'altezza che prevede distribuzione normale a valore medio nullo e deviazione standard  $\sigma_h$ .

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

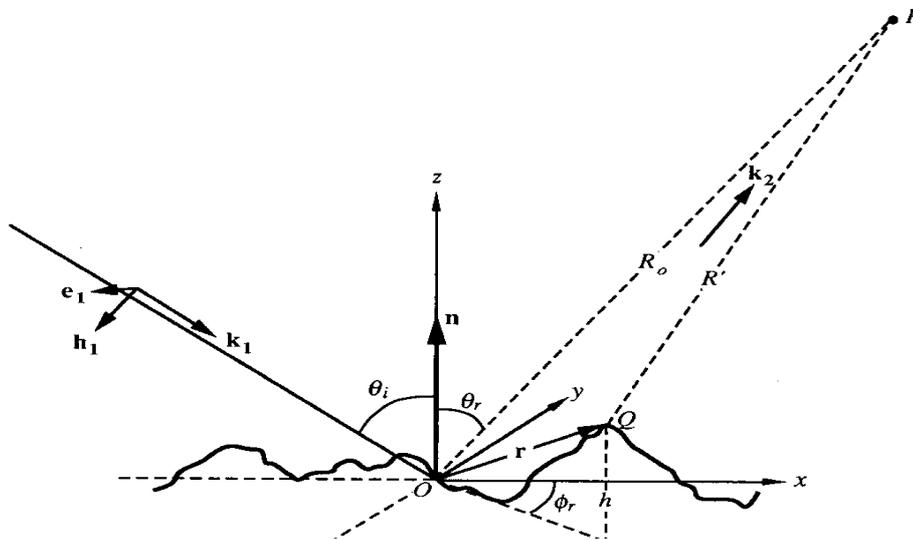


Fig. 2.24: Onda piana incidente su una superficie rugosa.

Il modello di Beckmann-Spizzichino prevede il campo medio e la potenza media diffusa da una superficie, descrivendo solo la riflessione speculare. L'energia diffusa è, qui, da intendersi come somma di due componenti: la "specular spike", che è all'incirca zero in tutte le direzioni di scattering eccetto che per un intervallo angolare molto stretto attorno alla direzione speculare; la "specular lobe", ossia lo scattering diffuso dovuto alla rugosità della superficie, distribuita attorno alla direzione speculare.

Nel caso di superfici perfettamente lisce, il lobo speculare scompare mentre la componente "a punta" è molto consistente. Al contrario, all'aumentare della rugosità, la componente a punta diminuisce di intensità a vantaggio di un rafforzamento della componente a lobo.

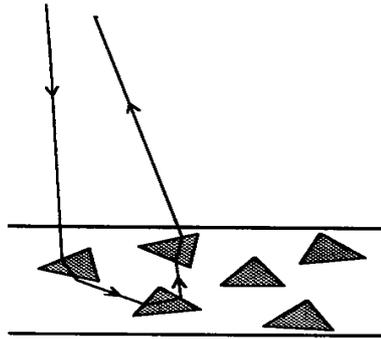
Sia in questo modello che in quello di Torrance-Sparrow, lo studio viene finalizzato alla rappresentazione grafica della radianza di superficie che si ricava dalla potenza diffusa: essa è la potenza per unità d'area e di angolo solido emessa dalla superficie.

Si prende, ora, in considerazione il modello di riflessione di Torrance-Sparrow ispirato dall'Ottica Geometrica e che ha l'obiettivo di dare una spiegazione ai meccanismi di riflessione speculare; tale modello incorpora anche il modello Lambertiano per descrivere la riflessione diffusa, qui intesa come conseguenza di fenomeni di scattering interno (si veda la figura 2.25).

Quando i raggi incidenti penetrano la superficie incontrano disomogeneità microscopiche e vengono, di conseguenza, ripetutamente riflessi e rifratti al limite di re-

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

gioni con diversi indici di rifrazione. Ecco, allora, che, se lo scattering interno genera radianza superficiale costante in tutte le direzioni, si ha scattering Lambertiano. Ne consegue che nel modello Torrance-Sparrow lo scattering Lambertiano è visto come meccanismo "di corpo" piuttosto che di superficie.



*Fig. 2.25: Riflessione diffusa generata dai meccanismi di scattering interno.*

Tale modello, proprio perché basato sull'Ottica Geometrica, vale solo se la lunghezza d'onda incidente è molto più piccola della misura della rugosità di superficie.

A differenza del modello visto di Ottica Fisica, il modello di riflessione ispirato dall'Ottica Geometrica usa il modello di distribuzione delle pendenze per dare una rappresentazione statistica della superficie. In particolare si approssima la superficie con un insieme di micro faccette planari. Poiché la micro faccette sono intese di dimensioni molto più grandi della lunghezza d'onda incidente e perfettamente lisce, il loro comportamento è, presumibilmente, speculare quanto a riflessione.

Il vettore normale ad una singola micro faccetta è considerato locale e può discostarsi dal vettore globale, relativo all'orientazione principale della superficie, di un angolo  $\alpha$ ; tale angolo viene assunto come misura della pendenza ed è, evidentemente, una variabile aleatoria.

Con riferimento alle figure successive (in particolare la figura 2.27), si capisce che solo le micro faccette planari i cui vettori normali sono contenuti dentro l'angolo solido  $d\omega'$  sono in grado di riflettere in modo speculare dentro l'angolo solido infinitesimo  $d\omega_r$ . Dall'uso della trigonometria si ricavano l'angolo locale di incidenza  $\theta'_i$  e la pendenza  $\alpha$  delle faccette riflettenti a partire da  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\phi_r$ . Il numero di faccette per unità d'area i cui vettori normali giacciono dentro l'angolo solido  $d\omega'$  è uguale a  $P_\alpha(\alpha) \cdot d\omega'$ .

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

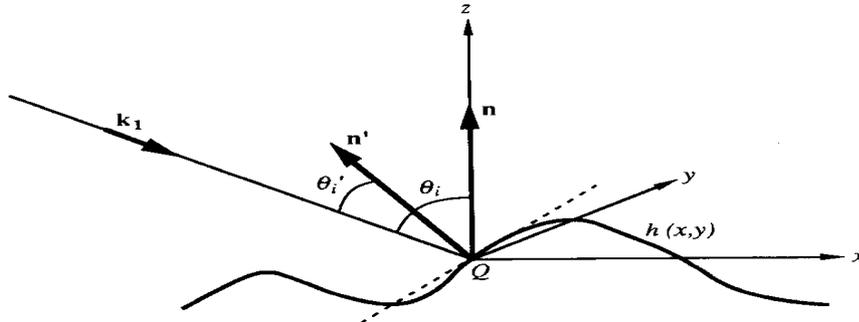


Fig. 2.26: Geometria locale di scattering con l'indicazione dell'angolo locale di incidenza  $\theta_i'$  e della orientazione locale della superficie  $n'$ , diversi dall'angolo globale di incidenza  $\theta_i$  e dall'orientazione principale della superficie  $n$ .

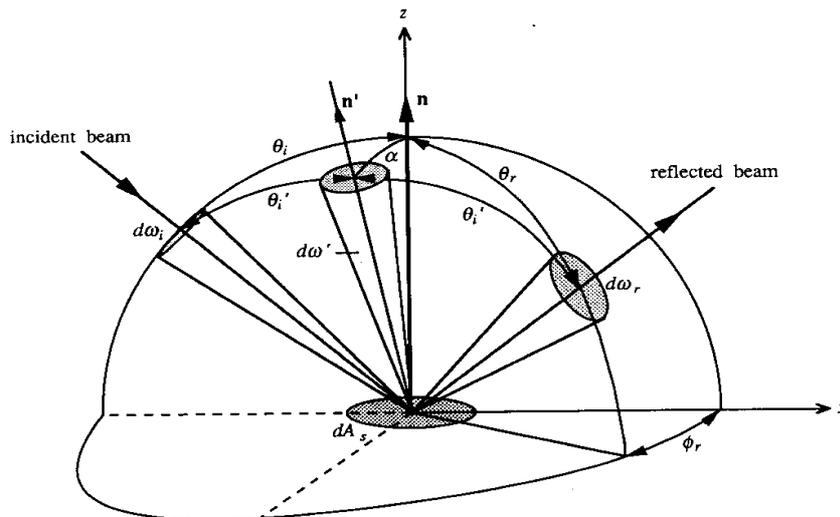


Fig. 2.27: Sistema di coordinate usato per la costruzione del modello Torrance-Sparrow.

Allora, l'area dei punti su  $dA_S$  che riflettono i raggi dalla direzione  $\theta_i$  dentro l'angolo solido  $d\omega_r$  è uguale a :  $\alpha_f \cdot P_\alpha(\alpha) \cdot d\omega' \cdot dA_S$  , dove  $\alpha_f$  è l'area della faccetta.

Si comprende che in questo approccio le considerazioni geometriche, in aggiunta a quelle di tipo probabilistico, permettono di determinare il flusso incidente sull'insieme delle faccette riflettenti e, tramite i coefficienti di Fresnel, il flusso riflesso dentro l'angolo solido in ricezione, nonché la radianza:  $L_r = d\phi_{riflesso} / (d\omega_r \cdot dA_S \cdot \cos(\theta_r))$  .

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

Torrance-Sparrow tengono anche conto della possibile ostruzione, da parte di alcune micro faccette, sul flusso incidente su una data micro faccetta o sul flusso riflesso da essa, tramite un fattore di attenuazione geometrica ossia una funzione di shadowing.

E' importante sottolineare che la dimensione delle faccette planari è considerata molto più grande della lunghezza d'onda incidente, cioè che  $\sigma_h \gg \lambda$ . Da tale assunzione consegue che è ragionevole supporre che i raggi siano riflessi da ogni faccetta solo nella direzione speculare. Al contempo, si ha che tale modello vale solo per superfici rugose ma non per superfici lisce; il modello Beckmann-Spizzichino vale, invece, sia per superfici lisce che rugose.

Dai diagrammi di radiazione, ottenuti da entrambi i modelli variando la direzione di incidenza, cioè la posizione della sorgente, oppure la posizione del ricevitore (sensore), si può costruire un quadro riassuntivo, capace di individuare le componenti principali di riflessione da una superficie: il lobo di diffusione, il lobo speculare, la componente "a punta speculare".

Il lobo diffuso spiega il fenomeno di scattering interno ed è distribuito attorno alla direzione normale della superficie (nell'ipotesi di scattering Lambertiano).

Il lobo speculare rappresenta la singola riflessione dell'onda incidente e tende ad essere distribuito attorno alla direzione speculare con picchi non in direzione speculare per alti valori di rugosità.

La "punta" speculare è indicativa della riflessione a specchio ed è dominante nel caso si considerino superfici lisce: essa si estende in un piccolo settore angolare incentrato sulla direzione speculare e la sua intensità varia in modo inverso a quella del picco del lobo speculare al variare della rugosità superficiale.

Una osservazione si può fare al riguardo della componente a lobo speculare: essa tende ad essere simmetrica rispetto alla direzione speculare nel caso di variazione della posizione della sorgente (tenendo fissa la posizione del ricevitore o sensore nel caso qui trattato di radiazione luminosa); invece si hanno picchi non speculari variando la posizione del sensore.

E' bene precisare che i due modelli esposti nel presente paragrafo hanno una impostazione diversa: è più rigoroso ma complicato da un punto di vista matematico il modello di riflessione ad Ottica Fisica di Beckmann-Spizzichino, mentre è più approssimativo ma semplice da usare il modello ad Ottica Geometrica di Torrance-Sparrow. Sia chiaro, però, che entrambi i modelli si basano sulle leggi della Fisica.

## 2 Modelli statistici di scattering da pareti di edifici

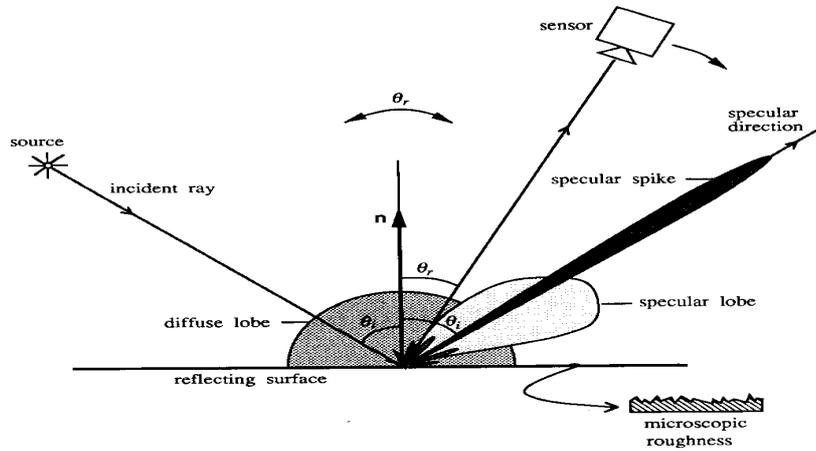


Fig. 2.28: Diagrammi polari delle tre componenti di riflessione viste come funzioni della direzione di ricezione per una fissata direzione di emissione.

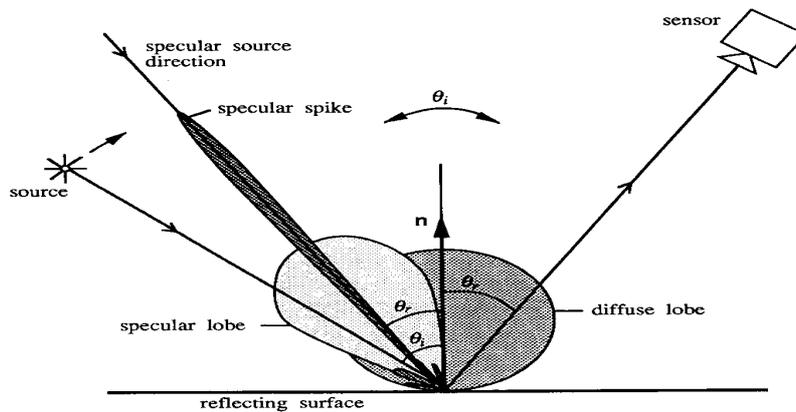


Fig. 2.29: Diagrammi polari delle componenti di riflessione ottenuti variando la posizione della sorgente per una fissata direzione di ricezione.

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

#### 3.1 Elementi di Ottica di Fourier

Ai fini della formalizzazione dello scattering diffuso inteso come processo aleatorio, è fondamentale fare riferimento alla teoria dell'Ottica di Fourier, che si configura come un potente strumento concettuale a nostra disposizione.

Si consideri il problema generale della diffrazione, illustrato dalla figura sottostante (Figura 3.1). Nota la distribuzione di campo, in ogni punto  $P_1$  di una regione limitata dello spazio  $\Sigma$  nel piano  $X_1Y_1$ , per esempio una apertura su uno schermo opaco, si è interessati a determinare il campo in ogni punto  $P$  oltre l'apertura.

Il problema può essere matematicamente espresso da quella che viene detta Formula di Rayleigh per la diffrazione:

$$\vec{E}(x_0, y_0, z) = 1/(j\lambda) \iint \vec{E}(x_1, y_1, 0) \cdot e^{jkr_{01}} / (r_{01}) \cdot \cos(\vec{n}, \vec{r}_{01}) d\Sigma \quad (3.1)$$

dove  $\cos(\vec{n}, \vec{r}_{01})$  è il coseno dell'angolo formato tra la normale alla superficie di apertura  $\Sigma$  (nel verso opposto all'asse  $z$ ) e il raggio vettore  $\vec{r}_{01}$  che congiunge i punti  $P_1$  e  $P_0$ . Questa non è altro che l'espressione matematica del Principio di Huygens-Fresnel, il quale afferma che il campo diffratto da una fenditura può essere considerato come la sovrapposizione delle onde elementari sferiche emesse da infinite sorgenti elementari, punti della superficie di apertura.

Nei casi reali, cioè di interesse pratico, la regione di osservazione è sempre limitata e di dimensioni lineari sempre molto minori della distanza tra l'apertura ed il piano immagine. Ciò può essere formalizzato dalle relazioni:

$|x_0|, |y_0| \ll z$  e  $|x_1|, |y_1| \ll z$  che esprimono la fondamentale Condizione Parassiale ad indicare che si possono considerare solo i raggi che formano piccoli angoli con l'asse ottico del sistema. Allora si può porre  $\cos(\vec{n}, \vec{r}_{01}) = 1$  e i raggi sono, con buona approssimazione, paralleli. Ne discende che è possibile trascurare la dipendenza dell'ampiezza da  $r$  e si può anche porre  $r_{01} = z$ .

L'espressione del campo sul piano immagine viene, così, scritto nella forma:

$$\vec{E}(x_0, y_0, z) = 1/(j\lambda z) \iint \vec{E}(x_1, y_1, 0) \cdot e^{jkr_{01}} d\Sigma \quad (3.2)$$

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

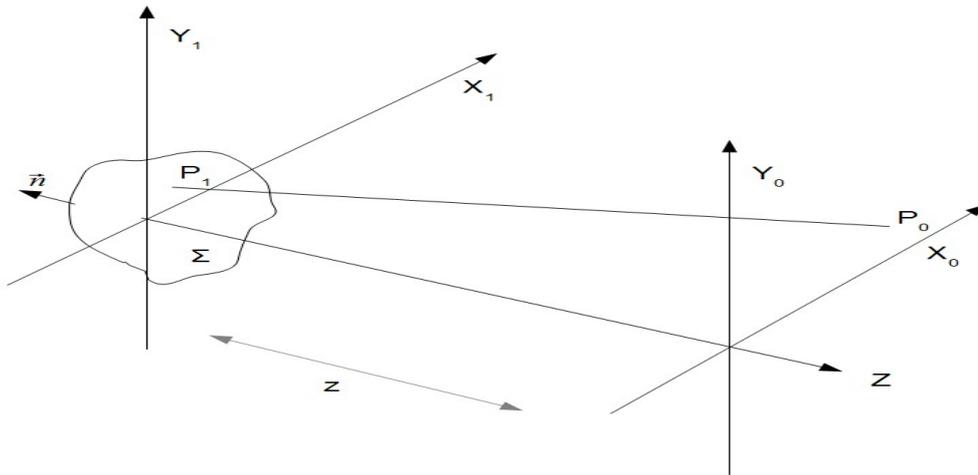


Fig. 3.1: Illustrazione del piano sorgente e del piano immagine nel problema generale della diffrazione.

Da notare che il campo immediatamente dopo l'apertura si ottiene a partire dal campo che illumina l'apertura moltiplicato per quella che possiamo chiamare trasmittanza cioè:  $E(x_1, y_1) = t(x_1, y_1) \cdot E_{inc}(x_1, y_1)$ , considerando per semplicità solo una componente scalare.

Una ulteriore approssimazione deve essere fatta sul termine  $r_{01}$ : per evitare variazioni di fase non trascurabili e, quindi, commettere un errore non è possibile nell'esponenziale sostituire  $r_{01}$  con  $z$ . Piuttosto si deve esprimere:

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} = z \cdot \sqrt{1 + ((x_0 - x_1)/z)^2 + ((y_0 - y_1)/z)^2} \quad (3.3)$$

e, tenendo conto della condizione parassiale e ricordando lo sviluppo binomiale

$$\sqrt{1+b} = 1 + b/2 + \dots \quad (|b| < 1)$$

si ha l'Approssimazione di Fresnel:

$$E(x_0, y_0) = (e^{jkz} / j\lambda z) \cdot e^{(jk \cdot (x_0^2 + y_0^2) / 2z)} \cdot \iint \{ E(x_1, y_1) \cdot e^{(jk \cdot (x_1^2 + y_1^2) / 2z)} \cdot e^{(-jk \cdot (x_0 \cdot x_1 + y_0 \cdot y_1) / z)} \} \cdot dx_1 dy_1 \quad (3.4)$$

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

In definitiva si è ottenuto il campo diffratto alla Fresnel. La trattazione della diffrazione nell'approssimazione di Fresnel fornisce buoni risultati nella regione molto vicina al piano di diffrazione e, più precisamente, a distanza dell'ordine delle decine di lunghezza d'onda della radiazione impiegata.

Nei casi in cui la diffrazione può trovare applicazioni pratiche, il piano di osservazione è, generalmente, posto a grande distanza (ordine del metro) dall'apertura di diffrazione. Si introduce, allora, quella che viene definita l'Approssimazione di Fraunhofer imponendo che la distanza  $z$  tra piano di apertura e piano immagine e le dimensioni della regione di apertura siano tali per cui possa valere la condizione:

$$z \gg k \cdot ((x_1^2 + y_1^2)_{max}) / 2 = (\pi / \lambda) \cdot ((x_1^2 + y_1^2)_{max}) \quad (3.5)$$

In tal caso è possibile trascurare il termine quadratico nell'integrale della (3.4) e, quindi, la distribuzione del campo nel piano immagine è:

$$E(x_0, y_0) = (e^{jkz} / j \lambda z) \cdot e^{(jk \cdot (x_0^2 + y_0^2) / 2z)} \cdot \iint E(x_1, y_1) \cdot e^{-jk \cdot (x_0 \cdot x_1 + y_0 \cdot y_1) / z} dx_1 dy_1 \quad (3.6)$$

che rappresenta il Campo Diffratto alla Fraunhofer. Si nota che il termine al di fuori dell'integrale è un fattore di fase che dipende solo dalla geometria dell'apertura, dalla posizione del piano immagine e dalla lunghezza d'onda dell'onda; ovviamente, l'integrale viene calcolato solo sulla superficie dell'apertura  $\Sigma$ .

E' un'espressione integrale che, in sostanza, descrive il campo nei punti del piano immagine nel senso di una sovrapposizione delle onde emesse dai punti dell'apertura, considerati come sorgenti, pesate da un opportuno fattore di fase.

A questo punto è bene fare la seguente osservazione. Il campo che contribuisce all'integrale è solo quello che corrisponde ai punti dell'apertura  $\Sigma$ ; invece, in tutti gli altri punti del piano oggetto, che ricadono sullo schermo opaco, tale campo si può considerare nullo. Ecco, allora, che nulla cambia se si estendono gli estremi di integrazione a tutto il piano sorgente.

In conseguenza di ciò, si giunge ad interpretare la diffrazione in un senso più generale che si inquadra in quella che viene definita Ottica di Fourier.

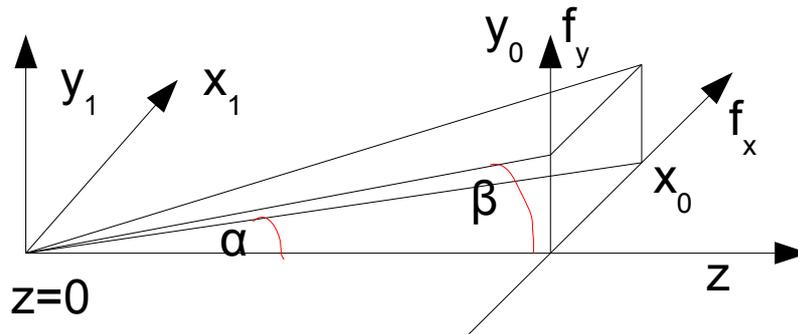
Si introducono, ora, due nuove variabili che chiamiamo frequenze spaziali:

$$\begin{aligned} f_x &= x_0 / (\lambda z) = \tan(\alpha) / \lambda \approx \alpha / \lambda \\ f_y &= y_0 / (\lambda z) = \tan(\beta) / \lambda \approx \beta / \lambda \end{aligned} \quad (3.7)$$

A parte il fattore  $1/\lambda$ , esse possono essere interpretate, geometricamente, come direzioni e corrispondono agli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  di diffrazione, rispettivamente nei piani  $x_0, z$

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

e  $y_0, z$ , vale a dire le direzioni angolari lungo le quali si va ad osservare il fenomeno della diffrazione.



*Fig. 3.2: Interpretazione della diffrazione come una distribuzione dell'intensità secondo certe direzioni angolari.*

Per ogni punto nel piano immagine c'è una corrispondente frequenza spaziale, come appare dalla figura 3.2. La  $f_0=0$  coincide con l'asse ottico del sistema, così come i massimi ed i minimi si trovano secondo particolari direzioni. La deviazione dalla direzione zero aumenta col diminuire della  $\lambda$  della radiazione.

Introducendo le frequenze spaziali nell'integrale della (3.4) si ottiene:

$$\vec{E}(x_0, y_0) = (e^{jkz} / j\lambda z) \cdot e^{jk(x_0^2 + y_0^2)/2z} \cdot \iint \vec{E}(x_1, y_1) \cdot e^{-j2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)} dx_1 dy_1 \quad (3.8)$$

nella quale l'integrazione viene eseguita nelle variabili  $x_1$  e  $y_1$  per valori da  $-\infty$  a  $+\infty$ : essa rappresenta la Trasformata di Fourier della funzione  $\vec{E}(x_1, y_1)$  nelle variabili  $f_x$  e  $f_y$ .

L'integrale della (3.8) altro non è che la trasformata di Fourier, della funzione di apertura (delle variabili indipendenti spaziali  $x, y$ ), nelle variabili che chiamiamo frequenze spaziali.

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

La relazione precedente si legge così: "Nell'approssimazione di Fraunhofer, vale a dire  $z \gg \pi \cdot (x_1^2 + y_1^2)_{max} / \lambda$ , quindi in condizioni di campo lontano dall'apertura, la distribuzione del campo nel piano immagine, a distanza  $z$  costante, è proporzionale, a meno di un fattore di fase quadratico, alla trasformata di Fourier della distribuzione del campo sull'apertura".

Nota la geometria dell'apertura, è possibile stabilire, a priori, la distribuzione del campo in un piano a distanza  $z$  fissata applicando l'operazione di trasformazione di Fourier. Per questo motivo la trasformata di Fourier viene anche detta spettro di Fourier o spettro di frequenze e, in tale caso, le frequenze sono frequenze spaziali, cioè indicano delle direzioni ossia degli angoli. Per esempio, il fenomeno della diffrazione diffonde l'energia che era localizzata nella zona di apertura secondo certe direzioni o, anche, secondo certe frequenze spaziali.

Se la funzione in esame fosse una funzione del tempo  $t$  anziché dello spazio  $x$ , sarebbe sufficiente sostituire  $t$  ad  $x$  e  $\omega$  (frequenza angolare temporale) a  $k$  (frequenza angolare spaziale).

In generale, una perturbazione può essere sintetizzata da una combinazione lineare di onde piane aventi diverso numero di propagazione e diverse direzioni di propagazione. Infatti, nel caso 3D le funzioni elementari sono del tipo

$$e^{-j(k_x \cdot x + k_y \cdot y + k_z \cdot z)} \quad \text{cioè} \quad e^{-\vec{j}\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad \text{che sono onde piane; le funzioni elementari sono}$$

orientate in direzioni diverse. Ciò significa che (in 2D), per un dato insieme di valori di  $k_x$  e  $k_y$ , gli esponenti o la fase delle funzioni elementari saranno costanti lungo delle linee:  $k_x \cdot x + k_y \cdot y = \text{costante}$ . L'orientazione delle linee di fase costanti è, quindi:

$$\alpha = \arctan(k_y / k_x) = \arctan(\lambda_x / \lambda_y) \quad \text{dove} \quad k_x = 2\pi / \lambda_x \quad (\text{analogamente per } k_y).$$

La lunghezza d'onda o periodo spaziale  $\lambda_a$  misurata lungo  $k_a$  è data da :

$$\lambda_a = 1 / \sqrt{\lambda_x^{-2} + \lambda_y^{-2}} \quad \text{e, quindi,} \quad k_a = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad . \quad (3.9)$$

Tutto questo significa che per costruire una funzione, oltre ai termini armonici  $k_x$  e  $k_y$ , si dovranno includere termini che sono orientati in direzioni diverse del dominio angolare.

Un modo per visualizzare ciò che si è esposto, per esempio il fronte emergente da una fenditura, è quello di pensare al nuovo fronte come ad una sovrapposizione di onde piane che emergono dalla fenditura in tutte le direzioni. Queste sono le componenti di Fourier che vanno in tutte le direzioni con specifici valori della frequenza angolare.

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

Il termine con frequenza angolare nulla corrisponde all'onda non deviata, mentre le frequenze angolari più alte formano un angolo maggiore con l'asse ottico.

Ciò che conta è che emerge in modo chiaro che la dipendenza spaziale è legata a quella angolare tramite la trasformata di Fourier.

### 3.2 Power-angle profile di scattering e funzione di autocorrelazione

Se si fa riferimento alla caratterizzazione multidimensionale del canale radio, si può affermare che il segnale di uscita prodotto dal canale è una somma di repliche ritardate di un tempo  $t_i$ , attenuate di una ampiezza  $\rho_i$  e sfasate di  $\vartheta_i$  del segnale originario.

Poiché in presenza di segnali modulati (passabanda) bisogna riferirsi al sistema passabasso equivalente, la risposta impulsiva del canale equivalente passabasso, nel caso più generale in cui viene fatto comparire anche l'angolo di arrivo (o di partenza), è:

$$h(t, \xi, \phi) = h(\phi) = \sum \rho_i \cdot \delta(\xi - t_i) \cdot \delta(\phi - \phi_i) \cdot e^{j[2\pi \cdot f_i t - 2\pi \cdot f_0 t_i + \vartheta_i]} \quad (3.10)$$

nella quale  $\xi$  è il tempo in eccesso ossia la variazione di tempo attorno al tempo assoluto in cui variano le fasi;  $t$  è il tempo assoluto o di campionamento del canale;  $f_i$  è la frequenza Doppler (con i terminali in movimento), mentre  $f$  è la frequenza assoluta e, infine,  $\phi$  è l'angolo.

Per quanto esposto sull'Ottica di Fourier nel paragrafo precedente, questo dominio angolare è legato, tramite una trasformazione di Fourier, al dominio spaziale:

$$h(s) = \sum \rho_i \cdot \delta(\xi - t_i) \cdot e^{j2\pi \cdot \phi_i \cdot s} \cdot e^{j[2\pi \cdot f_i t - 2\pi \cdot f_0 t_i + \vartheta_i]} \quad (3.11)$$

Di solito ci si riferisce ai profili di potenza, per esempio al "power-azimuth profile" definito come:

$$P_\phi(\phi) = |h(\phi)|^2 / \left( \int |h(\phi)|^2 d\phi \right) \quad (3.12)$$

Tale grandezza è normalizzata poiché vale:

$$\int P_\phi(\phi) d\phi = 1$$

Se è richiesta, come è nostro interesse, una valutazione statistica di  $P_\phi$  in un dato ambiente, si deve fare una media di  $M$  diversi campioni o realizzazioni di  $P_\phi$  per ricavare:

$$\bar{P}_\phi(\phi) \approx (1/M) \cdot \sum P^k(\phi) \quad \text{dove la somma va fatta per } k=1 \dots M. \quad (3.13)$$

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

Altro importante strumento concettuale a nostra disposizione è la funzione di (auto)correlazione, che fornisce una misura di quanto due segnali hanno proprietà comuni, cioè si assomigliano.

Normalmente, le correlazioni sono operazioni che si fanno su grandezze aleatorie dove assumono un significato statistico, mentre per segnali deterministici il risultato dell'autocorrelazione fornisce solo il contenuto energetico del segnale, di cui possiamo, ovviamente, usufruire anche nell'ambito di un processo aleatorio. Anzi spettro di energia e funzione di autocorrelazione sono, a meno di una costante moltiplicativa, legate tra loro dalla trasformazione secondo Fourier.

Date due variabili aleatorie  $x_1=x(t_1,\xi)$ ,  $x_2=x(t_2,\xi)$  definite sullo stesso processo  $x(t,\xi)$ , la descrizione della loro statistica congiunta si basa essenzialmente su un momento del secondo ordine, che è, appunto, la funzione di autocorrelazione:

$$E(x_1, x_2) = \iint x_1 \cdot x_2 \cdot p(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = C_{xx}(t_1, t_2) \quad (3.14)$$

dove l'integrazione viene eseguita per  $-\infty \leq x_1 \leq +\infty$  ed analogamente per  $x_2$  e  $p(x_1, x_2)$  rappresenta la densità di probabilità del secondo ordine.

Resta inteso che, come nostro interesse, si può sostituire il tempo  $t$  con lo spazio ossia con un dominio angolare nel senso visto con la trattazione dell'Ottica di Fourier.

L'importanza pratica della funzione di correlazione è nel suo ruolo di misura dell'indipendenza statistica di due (o dello stesso segnale se si fa riferimento all'autocorrelazione) segnali: essa è, infatti, pari a zero se i due processi sono completamente scorrelati; in particolar modo, la funzione di autocorrelazione sottoposta ad una operazione di trasformata di Fourier permette di trasferirci su considerazioni di tipo energetico, come ad esempio la densità di potenza angolare.

Elemento importante da tenere in considerazione è che un processo stocastico è ergodico se è possibile dedurre le sue proprietà statistiche a partire da una sola realizzazione del processo; perciò osservando come si realizza il processo stocastico una ed una sola volta, da questa uscita è possibile capire quali sono le proprietà statistiche dell'intero processo. Si può, quindi, affermare che l'ergodicità tratta il problema della determinazione della statistica di un processo da una singola realizzazione.

Per i processi ergodici si ha coincidenza fra medie statistiche e medie temporali e, più in generale, tra una qualsiasi valutazione fatta a priori sulla base della descrizione statistica del processo e la corrispondente valutazione fatta a posteriori sulla realizzazione del processo stesso osservata all'atto di un esperimento.

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

Ciò significa che il risultato di un qualsiasi rilievo statistico effettuato su una generica funzione dell'insieme coincide con probabilità uno con quello dell'analogo rilievo eseguito sull'insieme  $e$ , come tale, non dipende dalla particolare funzione presa in considerazione.

I processi ergodici sono un sottoinsieme dei processi stazionari e, dunque, tutte le realizzazioni di un processo ergodico hanno lo stesso valore medio temporale, la stessa funzione di autocorrelazione. Possiamo, allora, riferire queste grandezze al processo e parlare di valore medio, potenza, funzioni di autocorrelazione del processo.

#### 3.3 Schema di formalizzazione dello scattering quale processo aleatorio (modello a rugosità efficace)

Alla luce di quanto esposto nei paragrafi precedenti, si può pensare di ricavare i profili di potenza come trasformate di Fourier delle correlazioni nel dominio trasformato di Fourier. In modo più dettagliato, a partire da  $h(\phi)$  è possibile con una antitrasformata ottenere  $h(s)$ ; di qui si calcola la correlazione  $C(s)$  e, poi, grazie ad una trasformata si deriva l'espressione di  $P_\phi(\phi)$  ossia ciò che per noi rappresenta la densità di potenza angolare di scattering (power-angle profile).

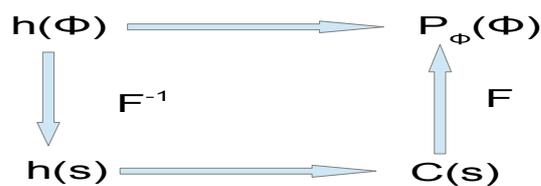


Fig. 3.3: Relazione tra densità angolare di potenza e funzione di correlazione.

Una volta che sono stati presentati gli strumenti teorici necessari, si procede ad un tentativo di formalizzazione dello scattering nel senso di un processo aleatorio, sempre nell'ambito del modello a rugosità efficace esposto nel capitolo 2.

### 3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio

Lo scattering distribuito è un processo aleatorio, funzione, di certo, della direzione di arrivo dell'onda incidente ma, anche e soprattutto, della direzione di emissione  $(\theta_s, \Phi_s)$ , vale a dire dell'angolo di scattering. Non ci si può, poi, dimenticare di tenere in considerazione la dipendenza dallo spazio.

Esistono due tipi di spazio. Innanzitutto, lo spazio assoluto  $(x',y')$  nel quale si posiziona la specifica "mattonella" della parete che viene presa in esame. Però, se si procede con l'ipotesi di ergodicità del processo, appare legittimo non considerare tale spazio quale variabile del problema. Quanto al secondo tipo di spazio di cui si è detto, esso è lo spazio relativo o, anche detto in eccesso ("excess space"):  $(x,y)$  consente di rappresentare la posizione del punto di emissione secondaria sulla mattonella e, in quanto tale, è legato a  $(\theta_s, \Phi_s)$  tramite la doppia trasformata di Fourier nello spazio.

Sembra lecito, per via del legame tra lo spazio relativo e l'angolo di scattering, non considerare tale spazio come variabile indipendente del processo aleatorio.

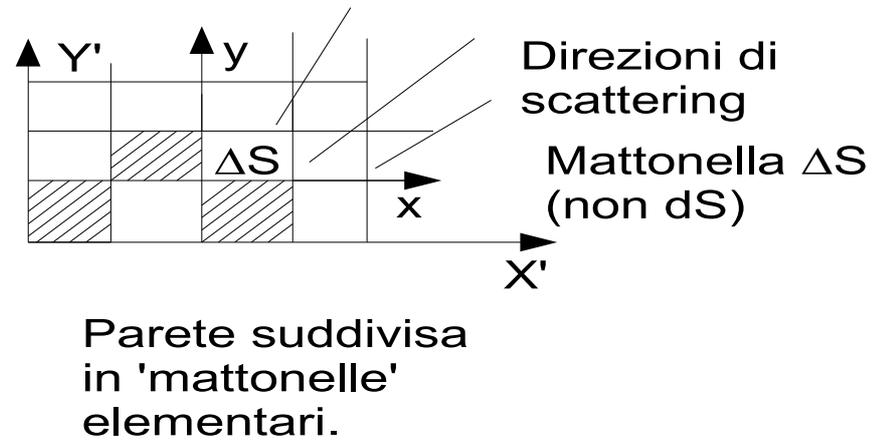
Lo spettro di onde piane del campo diffuso si pone, ma, è bene sottolinearlo, solo se vengono rispettate le condizioni di validità intrinseche all'Ottica di Fourier di cui si è parlato, in particolare la condizione parassiale, in corrispondenza biunivoca, tramite doppia trasformata, con la distribuzione di campo diffuso su  $(x,y)$ .

A partire dalla distribuzione di campo diffuso su  $(x,y)$  si ricava la funzione di doppia correlazione spaziale  $C(x,y)$ . Il passo successivo consiste, in maniera analoga a quanto fatto in precedenza per la distribuzione di campo, nello stabilire una corrispondenza, in virtù di una doppia trasformata di Fourier, tra la funzione di autocorrelazione spaziale e il power-angle profile di scattering, che è l'obiettivo che si vuole raggiungere, vale a dire il diagramma di scattering  $|E_s|^2(\theta_s, \phi_s)/2\eta$ .

E' importante sottolineare che le considerazioni fatte in precedenza valgono se la 'mattonella', individuata sulla parete, ha dimensioni piccole rispetto alla distanza a cui viene eseguita l'osservazione del campo ma, al contempo, grandi se paragonate alle irregolarità della superficie presa in esame ai fini dello studio dello scattering diffuso.

In sostanza, la 'mattonella' deve essere, come si usa dire, piccola ma non troppo ed ecco perché, come messo in evidenza nella figura sottostante (Figura 3.4), viene fatto riferimento ad una estensione finita  $\Delta S$  ma non ad una estensione infinitesima  $dS$ .

3 Modello a rugosità efficace: formalizzazione dello scattering diffuso come processo aleatorio



*Fig. 3.4: Sistema di riferimento relativo ed assoluto nella parete suddivisa in 'mattonelle' elementari.*

## 4 Simulazioni e conclusioni

### 4.1 Simulazioni

Si vuole verificare la validità del modello analitico a rugosità efficace che prende in considerazione lo scattering distribuito valutato in forma chiusa e non semplicemente lo scattering concentrato; quest'ultimo viene, di certo, calcolato in forma chiusa dal momento che si suppone un solo punto di scattering nel centro di ogni superficie, cioè di ogni parete di edificio.

La novità di tale approccio consiste nell'adoperare formule analitiche, tramite le quali si riesce a calcolare il "power angle profile", relativo allo scattering distribuito da pareti di edificio, limitando l'uso delle risorse computazionali.

Infatti, con riferimento ad una data parete di edificio rettangolare, si deve procedere, nel caso di terminali radio vicini alla superficie in esame, ad una discretizzazione in "mattonelle" elementari, ognuna delle quali è responsabile della produzione di contributi di scattering caratterizzati da differenti angoli di arrivo e differenti ritardi temporali.

La conseguenza della discretizzazione della parete è che bisogna elaborare i contributi di un gran numero di "mattonelle" elementari con notevole dispendio di tempo di simulazione. Disporre di formule analitiche, relativamente semplici, significa poter stimare la densità di potenza angolare al costo di tempi di calcolo non elevati.

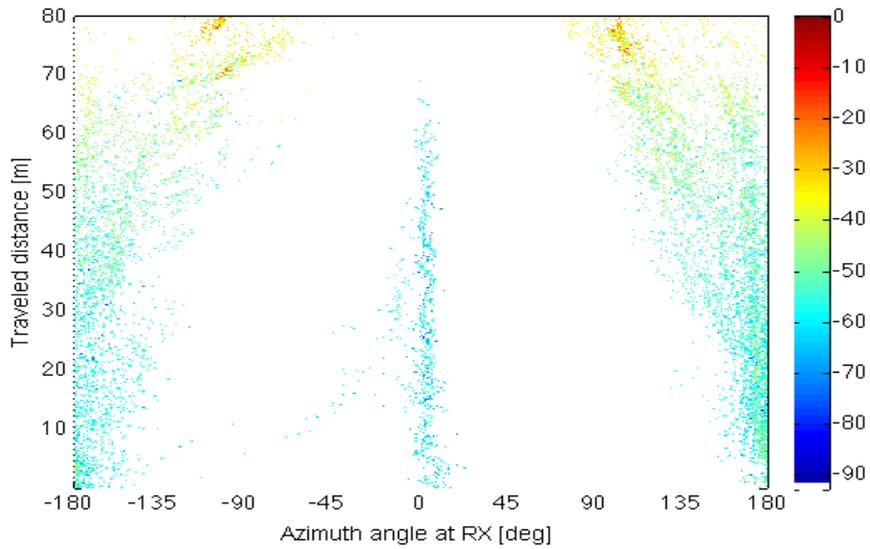
Viene fatto riferimento ad un tipico scenario urbano, "route 4" (Helsinki), e vengono mostrati i grafici che illustrano l'intensità del segnale ricevuto in funzione sia della posizione dell'antenna ricevente lungo la "route" che dell'angolo di azimuth in ricezione.

Ciò viene fatto rispettivamente per le misure, per la simulazione con scattering distribuito ed, anche, per la simulazione con scattering concentrato.

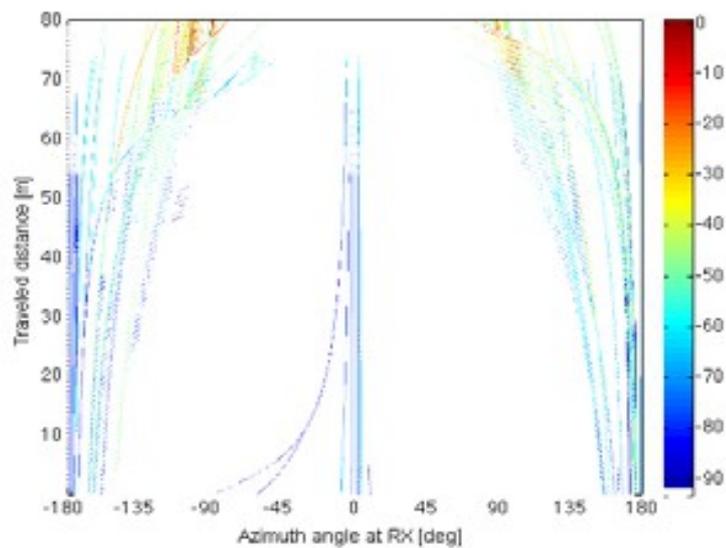
Tali grafici non sono stati prodotti nel presente lavoro ma servono come confronto con i risultati prodotti tramite un programma Matlab nel quale è stato implementato il modello analitico in esame e che costituisce l'effettivo lavoro descritto in questo capitolo; in tal modo si riesce, passando dalle misure alle simulazioni Ray Tracing e, infine, allo script Matlab, ad apprezzare il significato ed, anche, l'importanza del modello.

#### 4 Simulazioni e conclusioni

Si precisa che le misurazioni sono state eseguite, nella città di Helsinki, dal gruppo di lavoro del Professor Pertti Vainikainen (University of Technology, Helsinki).

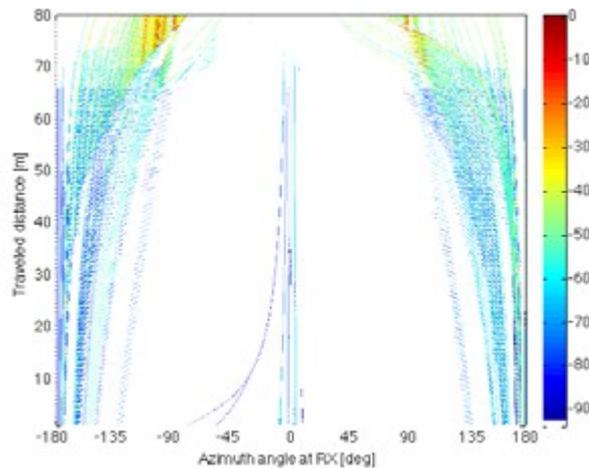


*Fig. 4.1: Misure eseguite con riferimento alla "route 4".*



*Fig. 4.2: Simulazione con scattering concentrato ("route 4").*

## 4 Simulazioni e conclusioni



*Fig. 4.3: Simulazione con scattering distribuito ("route 4").*

Risulta utile effettuare un confronto tra i risultati in formato immagine, vale a dire in termini di grafico multidimensionale "Power-Rx number-Azimuth", ottenuti con una simulazione Ray Tracing (con mattonelle quadrate di lato cinque metri) e con il programma Matlab; quest'ultimo ha dovuto tener conto dell'angolo di inclinazione della "route 4" rispetto al sistema di riferimento assoluto in cui sono state fornite le misure.

Qui ci si limita ad analizzare, in entrambi i casi, il contributo di solo scattering ma, in generale, si devono confrontare i grafici ricavati tramite una simulazione Ray Tracing completa con quelli disponibili a seguito di una simulazione i cui dati di ingresso sono i dati forniti dal Ray Tracing senza scattering e il contributo diffuso "off-line" valutato a posteriori sulla scorta del modello analitico in esame.

Si è, tra l'altro, voluto distinguere il caso della discretizzazione cartesiana della parete, in cui tale parete viene suddivisa in mattonelle quadrate della medesima dimensione, da quello della discretizzazione sferica nella quale le pareti viste dal ricevitore vengono osservate con un certo passo angolare ( si può, ragionevolmente, considerare un grado sia per l'azimuth che per l'elevazione).

L'accordo dei risultati appare, in ogni caso esaminato, soddisfacente e la comparazione dei tempi di simulazione sembra far preferire la modalità di discretizzazione sferica della parete: in effetti si assiste ad una contrazione dei tempi di circa tre o quattro volte rispetto al caso cartesiano. Le figure illustrate di seguito confermano ciò.

## 4 Simulazioni e conclusioni

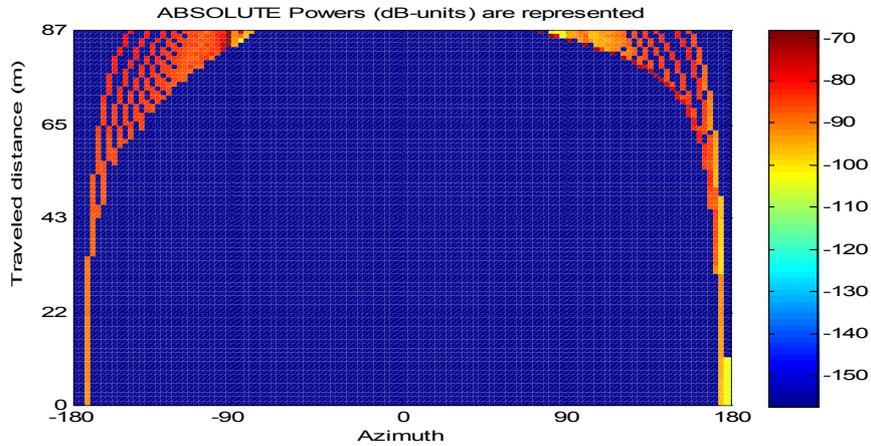


Fig. 4.4: Simulazione ray tracing della "route 4": distribuzione della potenza angolare in funzione della posizione del ricevitore e dell'azimuth.

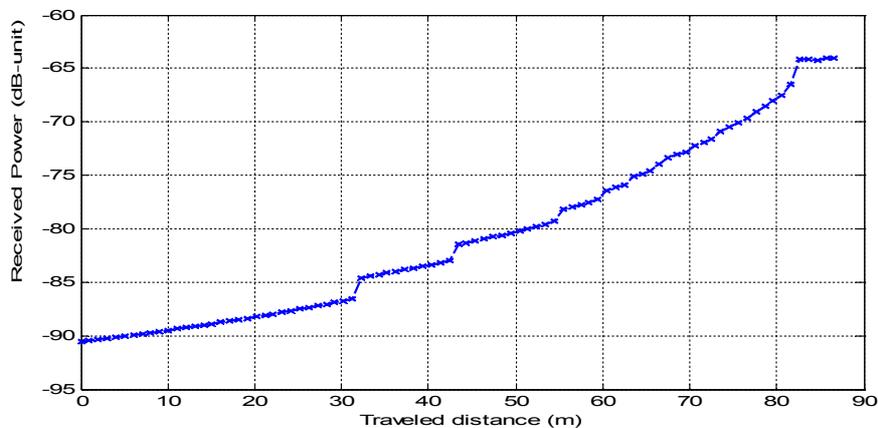


Fig. 4.5: Potenza ricevuta complessiva al variare della posizione ricevente (simulazione ray tracing).

Più precisamente, le due figure precedenti si riferiscono ad una simulazione Ray Tracing e costituiscono un metro di valutazione per la correttezza del programma Matlab, che ha il grande pregio di una notevole velocità di esecuzione; nelle simulazioni eseguite si hanno tempi di computazione di appena 207,8869 secondi nel caso cartesiano e di 69,9352 secondi in quello sferico.

#### 4 Simulazioni e conclusioni

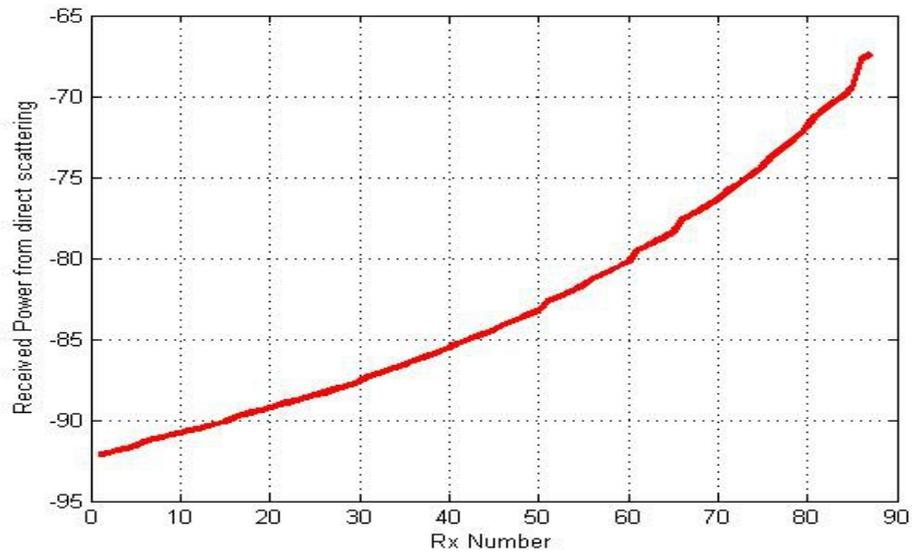


Fig. 4.6: Potenza ricevuta totale al variare della posizione del ricevitore (simulazione Matlab eseguita sulla "route 4" con discretizzazione cartesiana della parete adottando una mattonella quadrata di 0.5 metri).

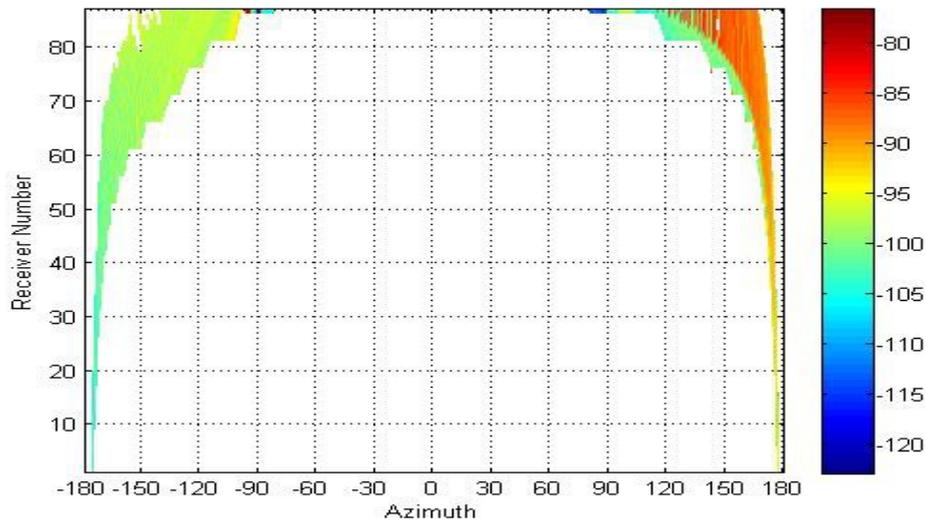


Fig. 4.7: Distribuzione della potenza angolare al variare della posizione del ricevitore e dell'angolo di azimuth (simulazione Matlab della "route 4" nel caso di discretizzazione cartesiana della parete).

#### 4 Simulazioni e conclusioni

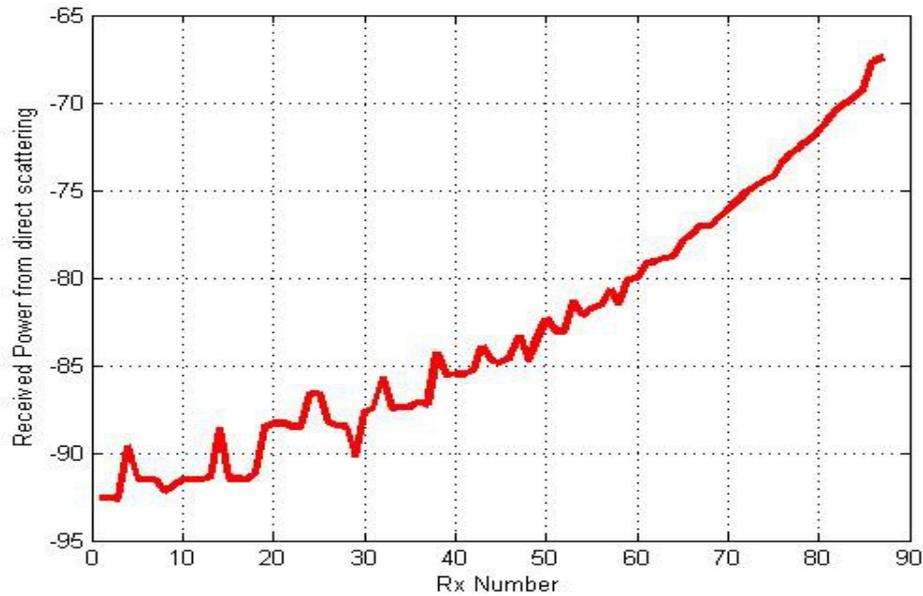


Fig. 4.8: Potenza totale ricevuta al variare del numero dell'antenna ricevente (simulazione Matlab della "route 4" nel caso di discretizzazione sferica della parete: passo angolare di un grado).

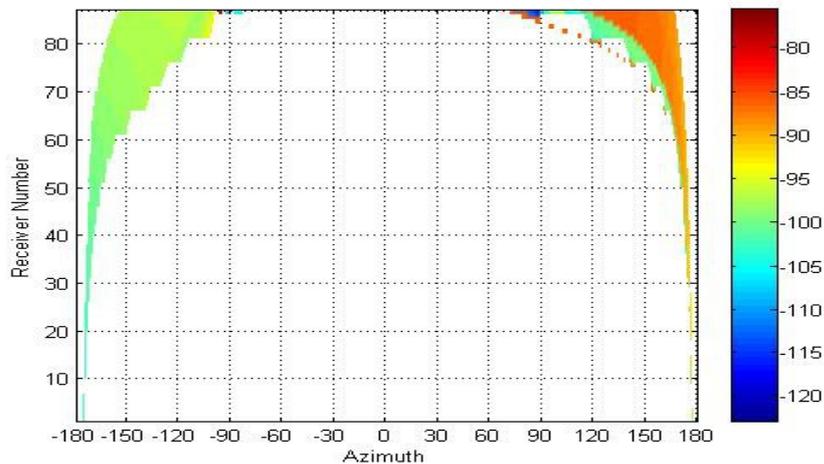


Fig. 4.9: Distribuzione della potenza angolare ricevuta al variare della posizione del ricevitore e dell'angolo di azimuth (simulazione Matlab della "route 4" nel caso di discretizzazione sferica della parete: passo angolare di un grado).

Per capire la differenza tra i tempi necessari per eseguire le simulazioni, basti pensare che una simulazione Ray Tracing completa, ossia capace di tenere conto di tutti

#### 4 Simulazioni e conclusioni

i vari fenomeni tipici della propagazione, può richiedere, in generale, svariate ore, mentre una simulazione basata sullo scattering "off-line", cioè valutato a posteriori sulla base del modello analitico adottato, con approccio cartesiano, anche alcune decine di minuti; invece, meno di una decina di minuti sono necessari per una simulazione "off-line" con approccio sferico.

Dall'esame dei grafici precedenti si nota che l'approccio "off-line" sottostima leggermente la potenza ricevuta; altra osservazione utile è che la discretizzazione sferica della parete riesce a cogliere meglio, in condizioni di campo lontano, la reale estensione delle porzioni di parete in cui viene suddivisa la parete stessa, visto che si procede con un passo angolare che non risente della distanza tra parete e punto di ricezione.

A questo punto, bisogna considerare anche il contributo coerente di potenza e, per così dire, sommarlo a quello fin qui considerato nel capitolo, cioè a quello di scattering diffuso.

Tale procedura permette di avere un raffronto completo tra simulazioni eseguite con Matlab e le misure, nonché le simulazioni effettuate con uno strumento software di Ray Tracing. Più nel dettaglio, vengono, dapprima, riportati i risultati in formato immagine relativi alle simulazioni Ray Tracing, posti, convenientemente, in scala in modo da rendere più agevole un confronto con i risultati forniti dallo script Matlab.

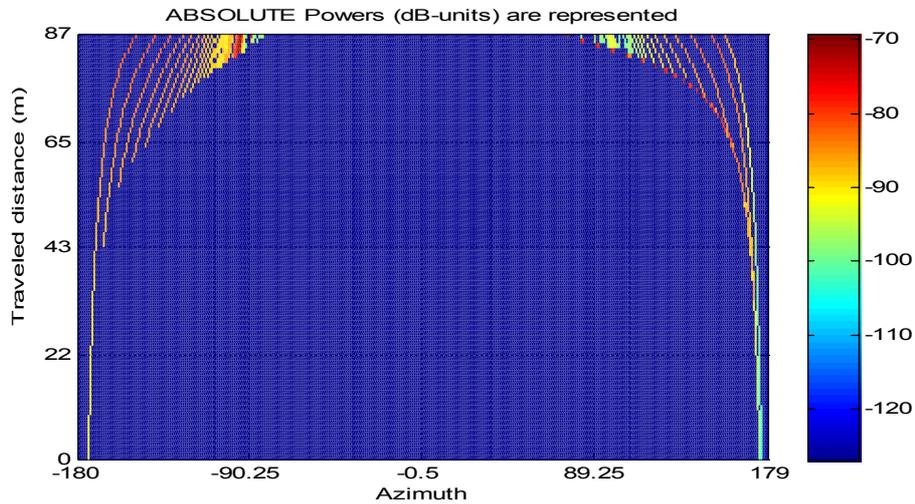
I risultati delle simulazioni Ray Tracing sono quelli a singolo scattering ma, anche, quelli ricavati considerando soli raggi coerenti (riflessioni, diffrazioni); ovviamente, viene anche fornito un risultato totale, ottenuto mettendo insieme scattering e interazioni coerenti.

In più, le simulazioni Ray Tracing rendono disponibile una matrice di dati relativi alle interazioni coerenti: essa viene sommata alla matrice, relativa al solo scattering, già ottenuta con gli script Matlab, consentendo, così, di verificare la somiglianza del risultato con quello ricavato dalle simulazioni nel caso generale di presenza di scattering e fenomeni "coerenti".

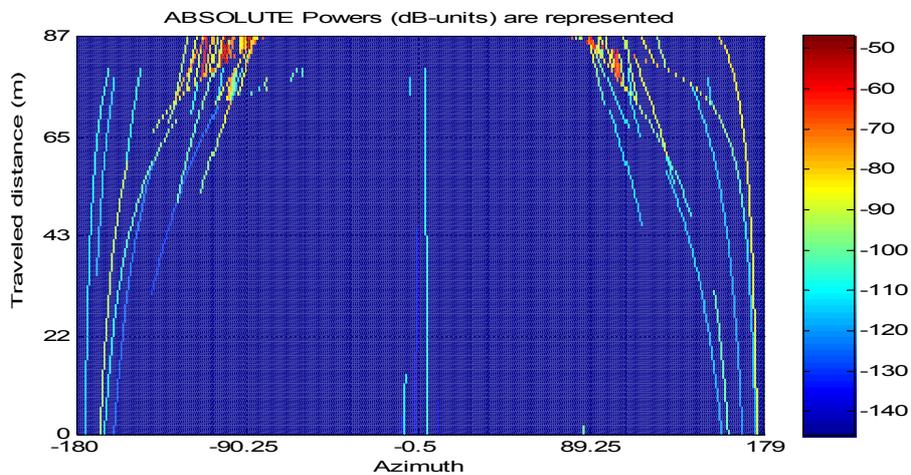
Infatti il programma Matlab usato si compone di diversi script (tra cui il Main), uno dei quali consente di produrre un grafico della potenza ricevuta in funzione della posizione del ricevitore e dell'angolo di azimuth di ricezione. Esso ammette due dati di ingresso: il primo è la matrice multidimensionale della potenza al variare del numero caratteristico dell'antenna ricevente e dell'angolo di azimuth, calcolata facendo ricorso

#### 4 Simulazioni e conclusioni

ad un approccio analitico al solo scattering; il secondo è la matrice calcolata adoperando una simulazione Ray Tracing, che non considera, però, lo scattering.



*Fig. 4.10: Distribuzione della potenza angolare al variare della posizione del ricevitore ottenuta con simulazione ray tracing eseguita sulla "route 4" considerando solo lo scattering.*

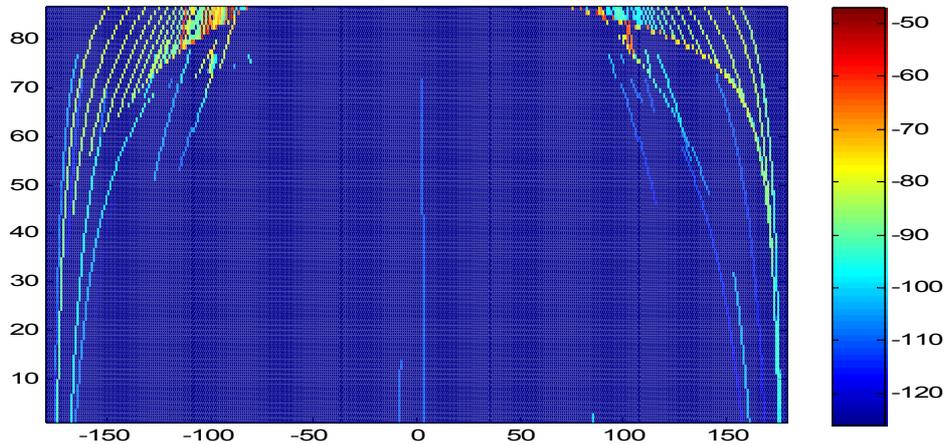


*Fig. 4.11: Distribuzione della potenza angolare in funzione del ricevitore e dell'angolo di azimuth ricavata tramite una simulazione ray tracing eseguita sulla "route 4" considerando solo interazioni coerenti.*

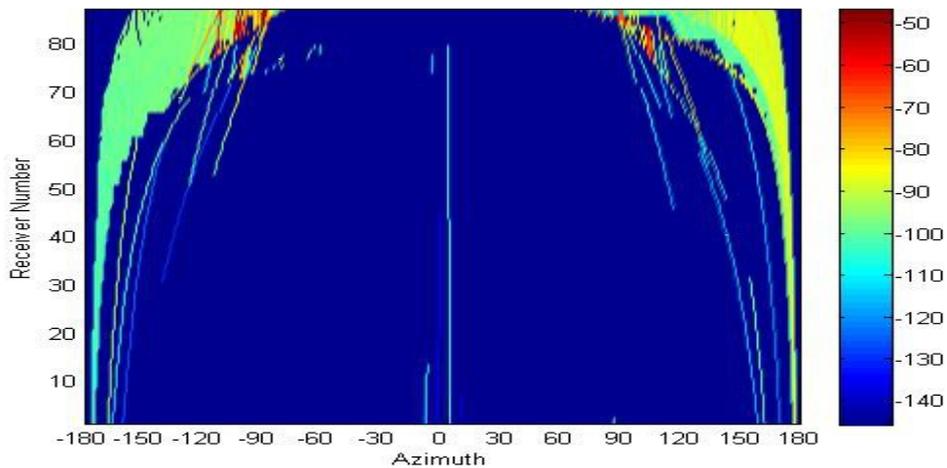
Di particolare interesse ai fini del confronto richiesto è la figura seguente che descrive l'andamento della potenza totale (combinando scattering ed interazioni coerenti)

#### 4 Simulazioni e conclusioni

al variare della posizione del ricevitore lungo la "route 4", nonché, dell'angolo di azimuth in ricezione, usando una simulazione ray tracing.



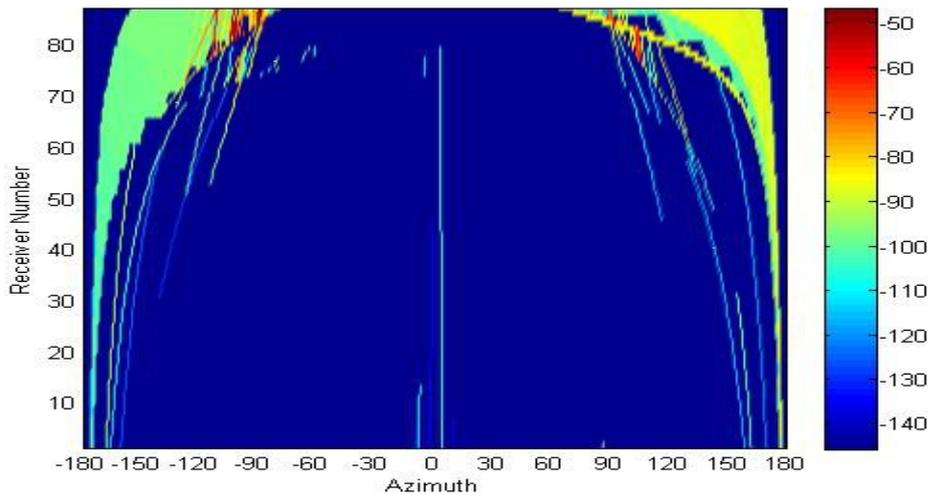
*Fig. 4.12: Andamento della potenza angolare, al variare della posizione del ricevitore e dell'angolo di azimuth, ricavato tramite una simulazione ray tracing eseguita sulla "route 4" considerando sia scattering che interazioni coerenti.*



*Fig. 4.13: Simulazione Matlab della distribuzione della potenza angolare totale al variare della posizione del ricevitore e dell'angolo di azimuth nel caso di discretizzazione cartesiana della parete.*

## 4 Simulazioni e conclusioni

E' interessante fornire, nella figura seguente, anche una indicazione di quanto si ottiene con una simulazione Matlab, nel caso generale, adottando una discretizzazione sferica della parete.



*Fig. 4.14: Potenza angolare totale ,in funzione della posizione del ricevitore e dell'angolo di azimuth, ottenuta tramite una simulazione Matlab, adottando una discretizzazione sferica della parete.*

Si può notare, in sostanza, un buon accordo tra misure, da una parte, e simulazioni Ray Tracing e Matlab, dall'altra. L'andamento osservato è tipicamente parabolico, con i due rami della parabola posti simmetricamente rispetto alla direzione di zero dell'angolo di azimuth: in effetti, lungo la linea di vista è ragionevole aspettarsi il maggior contributo di potenza.

### 4.2 Conclusioni

Lo scattering diffuso ha un ruolo di particolare rilevanza nella determinazione del grado di dispersione angolare e temporale del canale radio in ambiente urbano. Ciò significa che la conoscenza dei soli fenomeni di riflessione, diffrazione e rifrazione non è sufficiente al fine di una corretta previsione della propagazione elettromagnetica in uno scenario ad alta densità abitativa.

#### 4 Simulazioni e conclusioni

Eppure, fino a non molto tempo fa, gli effetti dispersivi dello scattering, originati da superfici non idealmente lisce ma, piuttosto, dotate di irregolarità e, quindi, di rugosità superficiale, non sono stati ritenuti importanti.

Una volta che si è sottolineato il significato dello scattering diffuso, la ricerca scientifica si propone di costruire modelli analitici, semplici ma, al contempo, efficaci, che possano essere implementati in software di simulazione e fornire, così, strumenti di progetto fondamentali.

La complessità del problema della propagazione delle onde radio in presenza di pareti di edificio dotate di irregolarità superficiale, disomogeneità nei materiali, obbliga a cercare una soluzione per via statistica .

Se si volesse affrontare il problema con rigore deterministico sarebbe indispensabile costruire database dettagliati in riferimento ad ogni singola irregolarità. Ciò non è possibile o, comunque, si avrebbero tempi di calcolo troppo elevati nell'eseguire le simulazioni.

Sono stati costruiti vari modelli analitici di scattering e tutti hanno in comune l'approccio stocastico alla soluzione del problema ed il fatto di essere basati sul concetto di raggio elettromagnetico. Ognuno di essi ha un suo proprio dominio di validità ed una sua complessità da analizzare in modo comparativo.

In ogni caso, il beneficio derivante dall'avere a disposizione un modello statistico di scattering è che esso può venire applicato a qualsiasi facciata di edificio senza conoscere tutti i dettagli architettonici delle varie strutture urbane.

In particolare, il modello analitico a "rugosità efficace" è statistico in quanto associa ad ogni parete di edificio un parametro, detto rugosità efficace, che tiene conto non solo della reale rugosità di superficie ma che riassume, in senso statistico, medio, tutte le irregolarità della parete.

In modo da tenere conto delle più svariate situazioni ambientali, vi è la possibilità, all'interno di tale modello, di effettuare scelte diverse sia per quanto riguarda il coefficiente di scattering che per ciò che concerne il diagramma di scattering.

Ad ogni diverso diagramma di scattering e ad ogni coefficiente di scattering corrisponde un'ipotesi sulla modalità di diffusione della parete di edificio.

A proposito del modello a rugosità efficace, si è cercato in questo lavoro di dare una formalizzazione dello scattering diffuso quale processo aleatorio.

#### 4 Simulazioni e conclusioni

Proprio l'Ottica di Fourier , pur nel rispetto di condizioni precise, grazie alla corrispondenza fornita tra dominio angolare ed una sorta di dominio spaziale, unita all'uso della correlazione spaziale, permette di raggiungere, almeno in parte, tale scopo.

E' doveroso soffermarsi sui risultati delle simulazioni eseguite, a proposito di uno specifico contesto urbano, adoperando il modello analitico a rugosità efficace.

Si è proceduto in maniera tale da poter effettuare un confronto completo tra misure, simulazioni Ray Tracing ed, infine, simulazioni condotte tramite script Matlab.

E' stato usato uno script Matlab che accetta in ingresso i risultati, in forma matriciale, delle simulazioni Ray Tracing, riferite alle interazioni coerenti, ed, anche, i dati che provengono da una simulazione Matlab relativa al solo scattering.

Questo modo di procedere può, di certo, costituire una via di investigazione capace di fornire interessanti risultati al fine di comprendere meglio, da un lato, il fenomeno della propagazione e, dall'altro, di formulare modelli analitici più precisi.

Ne emerge un buon accordo a conferma della validità dell'impostazione statistica che caratterizza il modello analitico a rugosità efficace.

In futuro, i modelli analitici, costruiti su suggerimento di accurate campagne di misurazioni, possono essere raffinati per comprendere ulteriori casi ed essere, quindi, più completi. Basti pensare ai fenomeni di back-scattering, di cui sono responsabili sporgenze architettoniche particolarmente pronunciate.

Comunque sia, la completezza del modello non deve significare eccessiva complessità perché si ha bisogno in campo scientifico di abbinare esaustività con semplicità onde ridurre i tempi di simulazione.

Risulta importante costruire modelli analitici semplici ma sufficientemente completi ed, al tempo stesso, realizzare software di simulazione che non manchino di tenere in debito conto fenomeni importanti come lo scattering diffuso.

## **Bibliografia**

- [1] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, e T. Kanade, "Surface reflection: physical and geometrical perspectives", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 13, Luglio 1991.
  
- [2] J. A. Kong, "Electromagnetic Wave Theory", MA: EMW Publishing, 1998.
  
- [3] P. Beckmann e A. Spizzichino, "The Scattering of Electromagnetic Waves From Rough Surfaces", New York: Pergamon Press, 1963.
  
- [4] V. Degli Esposti e H. L. Bertoni, "Evaluation of the role of diffuse scattering in urban microcellular propagation", in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, Olanda, Settembre 1999.
  
- [5] J. A. Holzer e C. C. Sung, "Scattering of electromagnetic waves from a rough surface", J. Appl. Phys. Lett., vol. 49, no. 3, Marzo 1978.
  
- [6] C. C. Sung e J. A. Holzer, "Scattering of electromagnetic waves from a rough surface", Appl. Phys. Lett., vol. 28, no. 8, Aprile 1976.
  
- [7] P. Pongsilamanee e Henry L. Bertoni, "Specular and Nonspecular Scattering from Building Facades", in: IEEE Transactions on Antennas And Propagation, vol. 52, no. 7, Luglio 2004.
  
- [8] D. Didascalou, M. Dottling, N. Geng e W. Wiesbeck, "An approach to include stochastic rough surface scattering into deterministic ray-optical wave propagation modeling", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 7, pp. 1508-1515, Luglio 2003.
  
- [9] V. Degli Esposti, "A diffuse scattering model for urban propagation prediction", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 49, no. 7, pp. 1111-1113, Luglio 2001.

## Bibliografia

- [10] V. Degli Esposti, Franco Fuschini, Enrico M. Vitucci, e Gabriele Falciasecca, "Measurement and Modelling of Scattering From Buildings", in IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 55, no. 1, pp. 143-153, Gennaio 2007.
- [11] V. Degli Esposti, Franco Fuschini, Enrico M. Vitucci, "A fast model for distributed scattering from buildings", in: Proceedings Of The European Conference On Antennas And Propagation: EUCAP 2009, pp. 1932-1936 (atti di: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION, Berlino, Germania, 23-27 Marzo 2009).
- [12] M. Born, E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, sesta edizione, 1980.
- [13] F. G. Bass e I. M. Fuks, "Wave Scattering From Statistically Rough Surfaces", , Pergamon, Oxford, 1979.
- [14] A. Papoulis, "Probability, random variables and stochastic processes", McGraw-Hill, quarta edizione, 2002.
- [15] Maurice Kwakkernaat e Matti Herben, "Modelling of angular dispersion due to rough surface scattering for implementation in ray-tracing based propagation prediction tools", in COST 2100 TD (09) 713, Braunschweig, Germania, 16-18 Febbraio 2009.
- [16] Jin Au Kong, "Electromagnetic Wave Theory", Wiley, 1986.
- [17] Akira Ishimaru, "Wave Propagation and Scattering in Random Media", Academic Press, New York, 1978.
- [18] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction", J. Opt. Soc. Amer., vol. 52, no. 2, pp. 116-130, 1962.
- [19] F. Fuschini, V. Degli Esposti, E. M. Vitucci, "A model for forward-diffuse scattering through a wall", in: Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Conference on Antenna and Propagation, pp. 1-4 (atti di: 4<sup>th</sup> European Conference on Antenna and Propagation (EUCAP 2010), Barcellona, Spagna, 12-16 Aprile).

## Bibliografia

- [20] P. Bassi, L. Scolari, R. Zoli, "Propagazione di onde elettromagnetiche", CLUEB 2009.