

SWAN (Surface waves analysis)



Note per l'interpretazione di dati REMI

Questo documento vuole essere una traccia per facilitare il primo approccio alla metodologia REMI. Tale tecnica è analoga alla MASW ed ha quindi con essa molte similitudini. Nelle pagine seguenti saranno quindi considerati noti alcuni concetti relativi alle onde superficiali e alle procedure di acquisizione, mentre saranno sottolineati gli aspetti caratteristici della tecnica REMI.

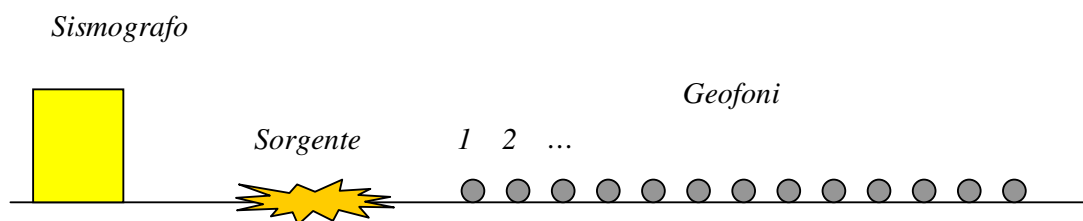
Per agevolare l'utente, il software **SWAN** è stato sviluppato in modo da rendere le differenze algoritmiche tra le due tecniche poco evidenti. Anzi, le tecniche risolutive sono state implementate in modo da risultare trasparenti per l'utente, con la conseguenza che **SWAN** consente di trattare i due casi in modo praticamente identico.

L'unica vera differenza tra le due tecniche risiede nell'interpretazione dello spettro del sismogramma acquisito per poter poi estrarre la curva di dispersione, che seguirà nei due casi procedure leggermente differenti. E' quindi questa la tematica che verrà qui approfondito maggiormente.

È necessario considerare che nella tecnica REMI il segnale utile ha un'ampiezza molto ridotta rispetto a quella del caso MASW, specialmente confrontandola con il livello di rumore di fondo. È necessario considerare, inoltre, che nel caso REMI è caldamente consigliato evitare tutte le operazioni preliminari di pulizia del sismogramma (operazione che invece può tranquillamente essere effettuata nel caso MASW). Si trova, dunque, che il rapporto segnale rumore è spesso, nel caso REMI, molto basso. Questo comporta che lo spettro risulterà tipicamente più disturbato di quanto accada nel caso MASW. Di conseguenza estrarre la curva di dispersione durante l'interpretazione dello spettro, in generale, diventa un passaggio più delicato. La procedura automatica di estrazione della curva di dispersione sarà quindi una fase che l'utente deve essere in grado di supervisionare, in modo tale che, se necessario, possa intervenire eventualmente con gli strumenti manuali che **SWAN** mette comunque a disposizione, per ottenere i risultati desiderati.

Uno dei vantaggi del metodo REMI è che coopera molto bene con in metodo MASW. Infatti non richiede attrezzatura aggiuntiva in cantiere o particolari conoscenze teoriche addizionali.

La strumentazione da utilizzare in cantiere con entrambe le metodologie consiste in un sismografo multi-canale, un cavo sismico e dei geofoni da collegare ad esso. Tipicamente il numero dei geofoni è pari a 24 o 48; a porre il limite è il numero massimo di canali di cui dispone il sismografo stesso. I geofoni utilizzati tipicamente sono quelli con frequenza di taglio di 4,5 Hz.



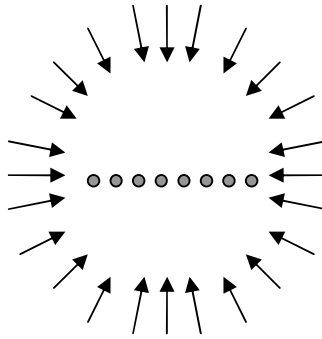
I geofoni saranno collocati sul terreno in linea retta, evitando anche di avere variazioni di quota tra i di loro e verranno posti ad una distanza costante (solitamente da 1 a 5 metri).

Durante una acquisizione MASW si registra il segnale legato ad una sorgente attiva, tipicamente generato tramite una comune mazza. La registrazione avrà una durata piuttosto breve, solitamente qualche secondo: da 1 a 3 secondi, in relazione alla distanza tra il primo e l'ultimo geofono ed alla velocità media che caratterizza il terreno. Tipicamente il rapporto segnale rumore è molto buono poiché il segnale generato dalla sorgente sovrasta nettamente il rumore di fondo, ma a causa di possibili interferenze con altre sorgenti presenti nelle vicinanze si preferisce sempre registrare più acquisizioni (tipicamente 5 volte sono sufficienti).

L'acquisizione REMI sfrutta esattamente la stessa disposizione di geofoni del caso MASW e non è necessario disporre di una sorgente attiva. Non è necessario quindi spendere ulteriore tempo in cantiere per ridisporre i cavi ed i geofoni per acquisire dati di tipo REMI una volta che sono già stati acquisiti dati MASW. Se si fosse invece interessati all'acquisizione solo di dati REMI, rimane comunque consigliabile una doppia acquisizione, ovvero acquisire dati relativi ad entrambe le metodologie. In questo modo è possibile risolvere eventuali ambiguità durante l'elaborazione dei dati REMI mediante le indicazioni comunque fornite dei dati MASW.

Durante l'acquisizione di dati REMI si registra il segnale relativo a microtremori spontaneamente presenti nell'ambiente. A generare i microtremori possono essere persone che camminano, mezzi che transitano su una strada, macchinari in funzione in un cantiere e altre attività umane o naturali. A causa della bassa intensità dei microtremori il rapporto segnale/rumore non è elevato. Aumentando la durata della registrazione aumenta il numero dei microtremori acquisiti, e automaticamente il rapporto segnale/rumore tende a migliorare. La singola registrazione in genere dura da 1 a 5 minuti, in funzione della capacità di memoria del sismografo utilizzato. Si deve comunque poi ripetere l'acquisizione per arrivare a registrare complessivamente 10 o 20 minuti di segnale.

Nel caso MASW la posizione della sorgente rispetto ai geofoni è sicuramente nota ma nel caso REMI i microtremori provengono da sorgenti assolutamente non localizzabili. La tecnica REMI richiede che i microtremori acquisiti godano di una particolare proprietà: che siano *isotropici* (ovvero che valga *l'omnidirezionalità delle sorgenti*). E' richiesto cioè che i microtremori provengano da sorgenti collocate in ogni direzione rispetto ai geofoni e che l'energia del segnale acquisito sia omogenea per ogni direzione considerata. Ad esempio non è soddisfatta tale ipotesi se i microtremori provengono principalmente da alcune direzioni preferenziali.

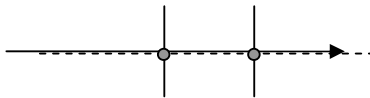


Se l'ipotesi di isotropia è soddisfatta è possibile semplificare la fase di elaborazione riuscendo a fare a meno della conoscenza delle posizioni di *tutte* le sorgenti relative a *tutti* i microtremori acquisiti. Ogni microtremore nel terreno si muove ad una data velocità (d'ora in poi *velocità reale*). Conseguentemente all'inclinazione con cui il microtremore raggiunge l'allineamento dei geofoni, questo verrà associato, a seguito dall'analisi del sismogramma, ad una *velocità apparente* che sarà certamente superiore (o uguale) alla velocità reale.

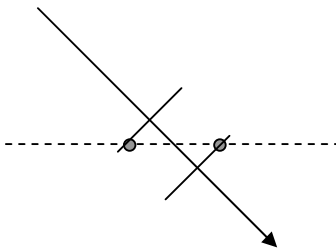
Semplificando parzialmente il problema, diventa abbastanza intuitivo il seguente ragionamento: si consideri un'unica sorgente impulsiva e due soli geofoni e si ipotizzi che la sorgente sia sufficientemente lontana dai geofoni in modo da poter approssimare il fronte d'onda di propagazione dell'onda ad un fronte d'onda piano. Si assuma che la propagazione dell'impulso sia pari ad una certa velocità (reale), non nota, uguale in ogni punto del terreno tra i geofoni e la sorgente.

Si rileva quindi l'istante di arrivo del primo impulso a ciascun geofono. Dal rapporto tra la distanza tra due differenti geofoni e del ritardo temporale di arrivo dell'impulso si può calcolare la velocità (apparente) di propagazione dell'impulso.

La sorgente che si trova perfettamente in asse con l'allineamento dei geofoni verrà associata ad una velocità apparente coincidente con la reale velocità di propagazione.

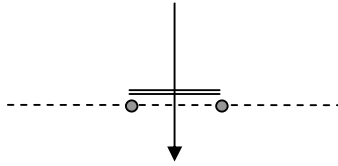


Sorgenti che non sono in linea con i geofoni faranno misurare una velocità apparente diversa da quella reale. Infatti, a causa dell'inclinazione che si crea tra il cammino dell'impulso e l'asse dei geofoni, si ha che il fronte d'onda del segnale percorre realmente una distanza minore di quella che c'è tra i due geofoni durante il ritardo temporale misurato. Di conseguenza dal rapporto ottenuto viene misurata una velocità apparente superiore a quella reale.



Più l'inclinazione tra il cammino dell'onda e l'asse dei geofoni è marcata più elevata sarà la velocità apparente calcolata. La situazione limite si ha quando la direzione di propagazione dell'onda è

perpendicolare all'asse dei geofoni: in questo caso la velocità apparente misurata sarà molto elevata (infinita). Questo perché il ritardo temporale rilevato tra i due geofoni sarà praticamente nullo.



Si può inoltre associare un segno alla velocità apparente. Per far questo basta dare un nome ai due geofoni, ad esempio "A" e "B". Si può quindi introdurre la convenzione che una velocità apparente è positiva se l'impulso viene rilevato prima al geofono "A"; viceversa si parlerà di velocità apparente negativa se l'impulso viene rilevato prima al geofono "B". La velocità reale rimane sempre una quantità ovviamente positiva e certamente indipendente dai geofoni in quanto è una caratteristica propria del terreno.

Concludendo, la "velocità apparente" in valore assoluto è sempre superiore (o uguale) alla "velocità reale". La velocità apparente non risulta avere invece limite superiore al suo valore assoluto, che può essere anche infinito. Il suo segno e valore assoluto differiscono dal valore "reale" esclusivamente dalla direzione da cui proviene l'impulso.

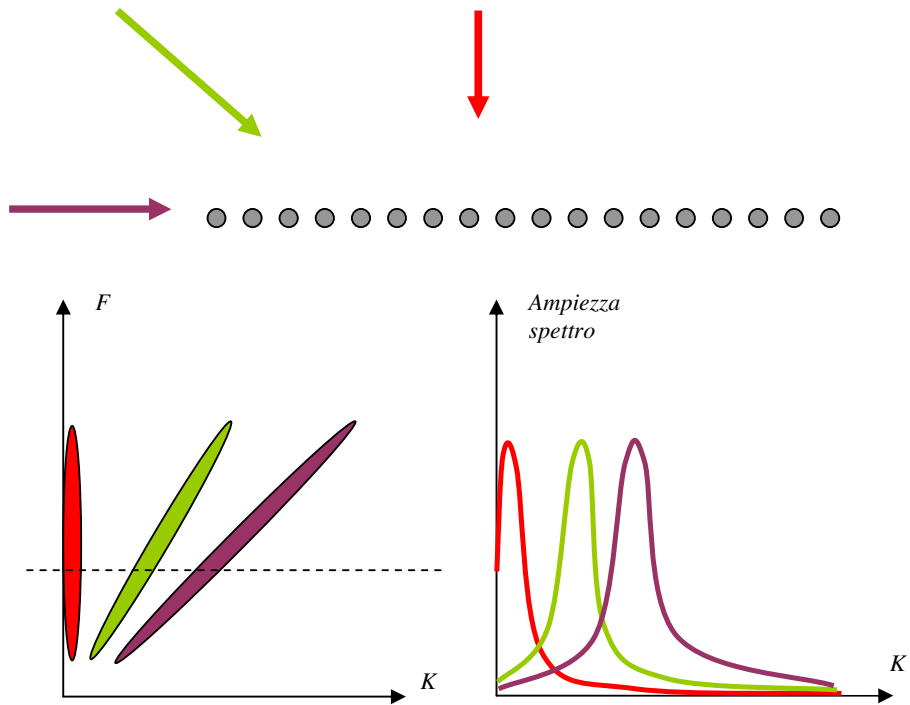
Nell'analisi delle onde superficiali, a seguito del fenomeno della "dispersione" ogni frequenza dell'onda si propaga ad una velocità (reale) diversa. L'analisi spettrale dovrà essere ripetuta per ogni singola frequenza in interesse ottenendo una lista di valori di velocità per le date frequenze analizzate: si ottengono in questo modo dei campioni della "curva di dispersione" (nel dominio frequenza-velocità).

Nella teoria REMI i microtremori acquisiti non verranno trattati singolarmente, poiché non sarebbe una operazione banale isolarne il debole contributo all'interno del sismogramma. I microtremori vengono quindi trattati tutti nel loro complesso. Nel sismogramma non sarebbe semplice la distinzione tra le singole velocità apparenti rilevate. Tale distinzione può più agevolmente essere fatta analizzando i dati nel dominio spettrale.

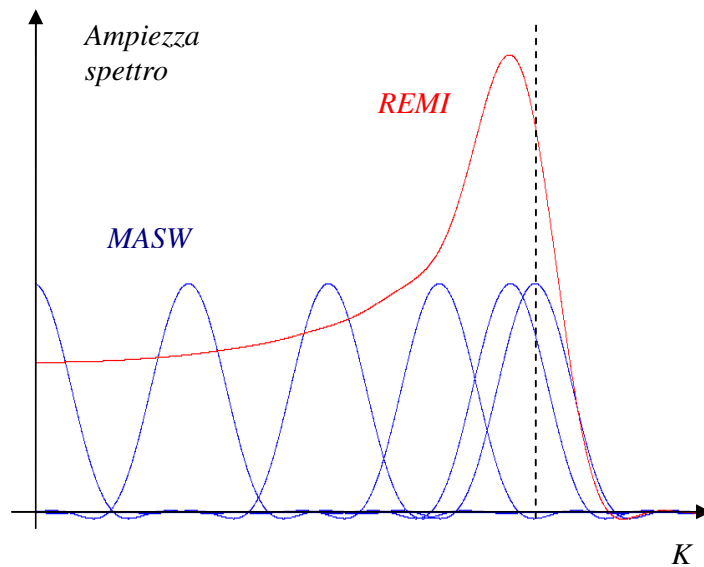
Nello spettro FK la variazione dell'angolo tra la direzione di propagazione dell'impulso e l'asse dei geofoni, ovvero l'aumentare della velocità apparente, si manifesta con una banale rotazione dello spettro di una quantità legata al valore dello stesso angolo.

In figura sono mostrati schematicamente tre situazioni: il caso con sorgente in linea con l'asse dei geofoni, il caso con un'inclinazione di circa 45° , e il caso con perpendicolarità tra gli assi.

E' mostrata la geometria di acquisizione ed è mostrata una schematizzazione dello spettro FK con indicazione di dove si dovrebbe osservare l'energia relativa al singolo microtremore, ed infine è mostrata una sezione di tale spettro ad una frequenza determinata (vedi linea tratteggiata sullo spettro).

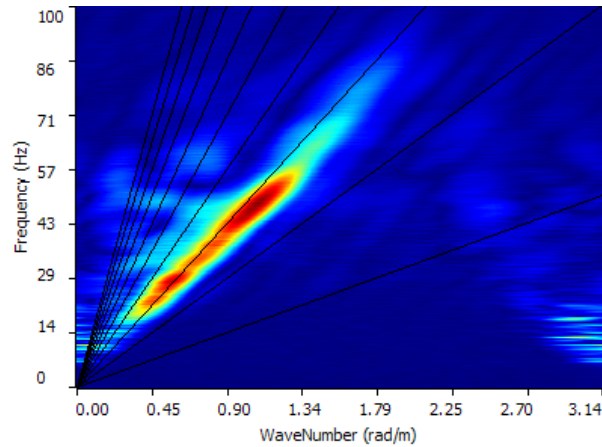


Nel tipico spettro FK (REMI) si vedrà la sovrapposizione degli effetti dei vari microtremori. Tale sovrapposizione è mostrata in figura, dove si vede la composizione di una sezione simulata (ad una data frequenza) dello spettro FK (REMI) a partire dagli effetti dei singoli microtremori. La linea verticale tratteggiata è l'indicazione della velocità reale a tale frequenza. Come si vede si sovrappongono effetti legati a velocità apparenti di valore maggiore (ovvero associati ad un numero d'onda K minore).

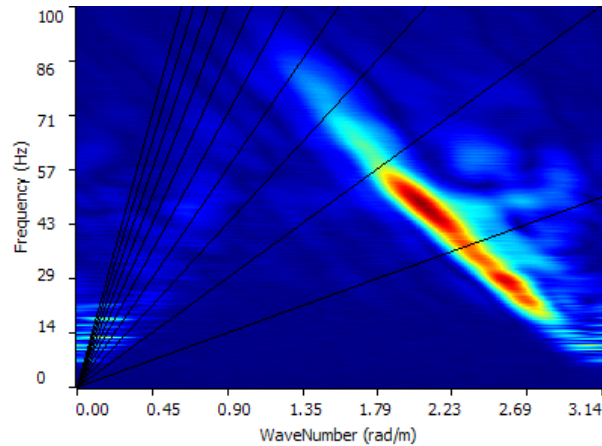


In figura è mostrato un esempio reale di spettro FK relativo a dati MASW.

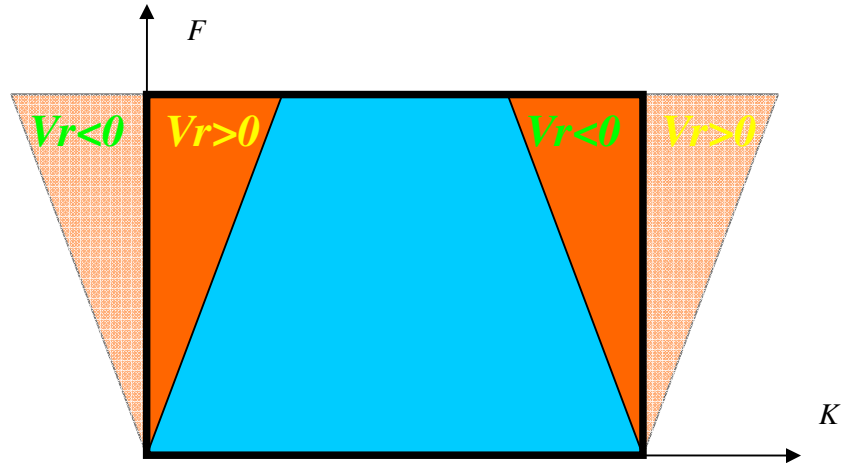
In questo caso si vede che l'energia si distribuisce principalmente su una linea approssimativamente passante per l'origine (area con colore tendente al rosso). L'inclinazione della linea è tale da indicare una velocità di propagazione apparente positiva.



Se la sorgente fosse all'altra estremità della linea dei geofoni lo spettro ottenuto sarebbe analogo a quello mostrato in figura. In tal caso la linea su cui si colloca l'energia denota una velocità di propagazione apparente negativa.

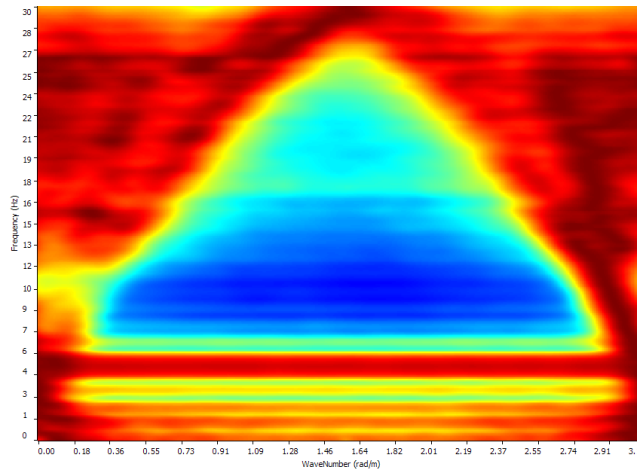


Per facilitare l'interpretazione di questo spettro si deve tener conto della ciclicità dello spettro a seguito delle proprietà della trasformata di Fourier. Lo spettro FK (sia MASW che REMI) ha la proprietà di essere periodico lungo l'asse K. Un modo per avere una corretta visione delle informazioni in esso contenute è pensare di arrotolarlo creando un cilindro in modo da far coincidere il lato sinistro dello spettro con il suo lato destro. In figura è schematicamente indicato dove si collocano tremori con velocità apparenti positive e negative, al tempo stesso viene anche evidenziata graficamente la periodicità dello spettro.



In figura è infine mostrato uno spettro FK relativo al metodo REMI. Si nota che l'area colorata in rosso, che evidenzia la presenza di energia, può essere ricondotta a velocità apparenti sia positive che negative. Si nota la presenza di velocità apparenti anche molto elevate in valore assoluto. Si nota anche l'assenza di energia (area colorata in blu) a velocità inferiori ad una certa soglia, a conferma delle aspettative. Tale soglia è, come mostrato precedentemente, legata alla velocità reale di propagazione dell'onda nel terreno in analisi.

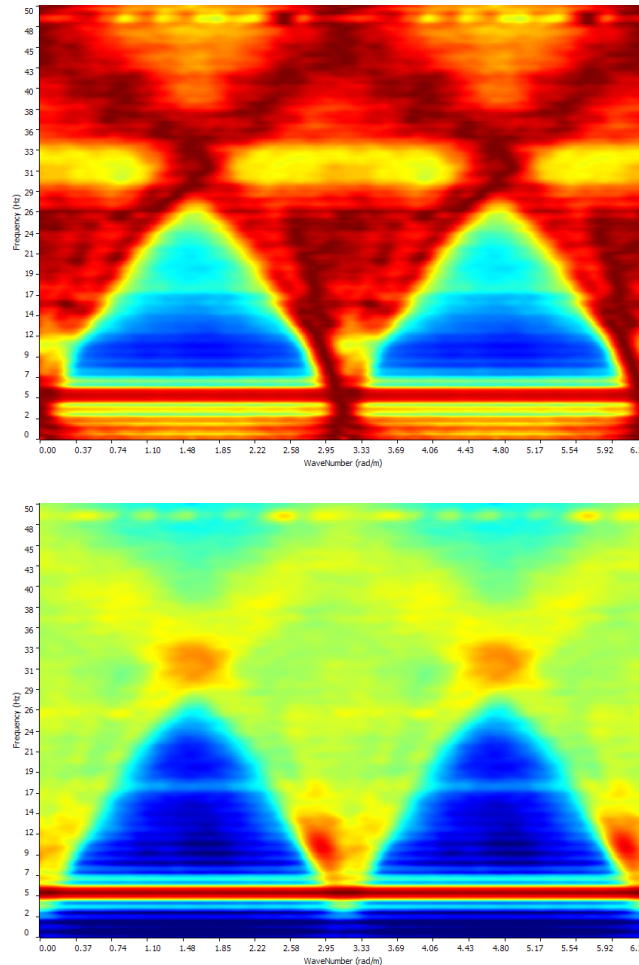
Si può notare un disturbo abbastanza omogeneo a basse frequenze. Tale informazione non è da ricondurre, in fase di analisi dello spettro, ad eventuali onde in propagazione, ma soltanto a rumore associabile a limiti fisici di operatività dei geofoni utilizzati.



SWAN visualizza lo spettro relativo al metodo REMI per default normalizzando frequenza per frequenza per aumentare sensibilmente il contrasto grafico con il rumore di fondo anche a frequenze dove i microtremori sono deboli.

SWAN inoltre affianca alla prima immagine dello spettro una seconda immagine identica, giustificando questo con la proprietà della periodicità precedentemente citata. Questa scelta consente di osservare la parte centrale dell'immagine che si è ottenuta per più facilmente analizzare la simmetria dello spettro. Questo per poterne valutare la qualità, specialmente nell'ottica della validazione della proprietà dell'isotropia (o omnidirezionalità) delle sorgenti.

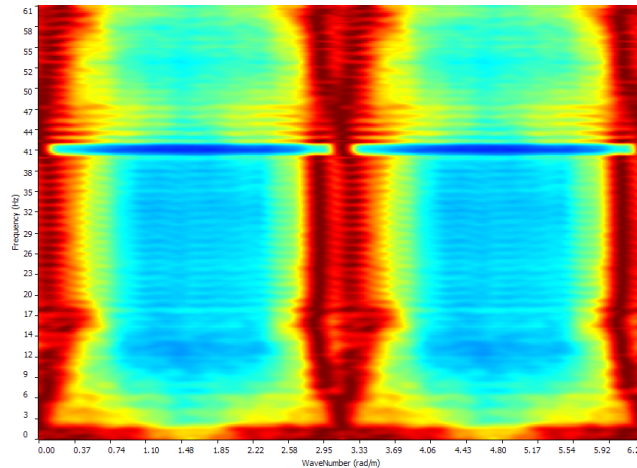
In figura è mostrata l'immagine ottenuta ponendo due copie dello stesso spettro REMI affiancate. Segue una figura che mostra lo stesso risultato visualizzato senza la normalizzazione delle ampiezze frequenza per frequenza, ma tramite una rappresentazione in scala logaritmica delle ampiezze dello spettro.



Osservando la simmetria dello spettro nella zona centrale, ovvero in corrispondenza della giunzione tra le due copie dello spettro, si può avere una indicazione di quanto è soddisfatta l'ipotesi di isotropia delle sorgenti. In questo caso, trascurando una leggera asimmetria abbastanza evidente intorno alla frequenza di 10Hz, lo spettro è sufficientemente simmetrico per poter procedere con l'elaborazione.

In figura è mostrato uno spettro FK REMI in cui si può riscontrare una forte asimmetria dovuta evidentemente alla non isotropia delle sorgenti. In tal caso l'analisi sarà molto laboriosa o addirittura impossibile a seguito della mancata validità delle ipotesi iniziali.

In particolare, si può intuire la presenza di una sorgente dominante sulle altre. Tale sorgente probabilmente fa giungere molti microtremori in direzione perpendicolari rispetto all'asse dei geofoni: infatti è dominante il contributo energetico relativo a velocità apparenti estremamente elevate. Al tempo stesso risulta quasi completamente assente il contributo dovuto ai microtremori che giungono con direzione obliqua o parallela all'asse dei geofoni. È piuttosto evidente, inoltre, che il segnale in questo caso è disturbato anche da un rumore che apporta delle striature orizzontali allo spettro su tutto l'intervallo di frequenze osservato.



Durante la fase di interpretazione dello spettro l'obiettivo è stimare le velocità reali di propagazione dell'onda sismica alle varie frequenze. La curva di dispersione sperimentale non è altro che l'insieme di queste velocità ottenute nell'intervallo di frequenze in interesse.

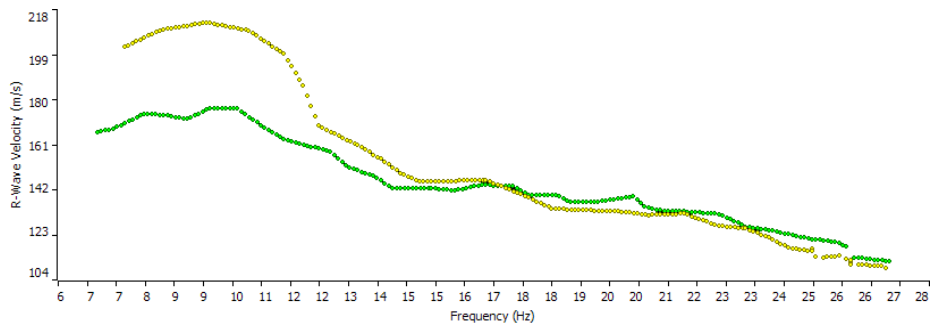
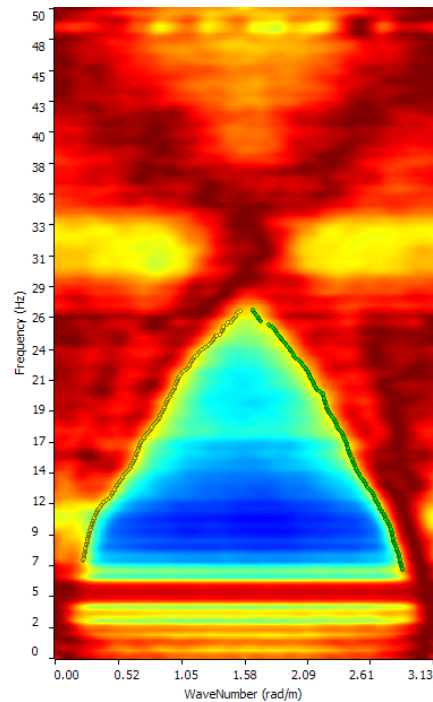
Nel metodo MASW, a seguito della geometria di acquisizione, la velocità apparente coincide con la velocità reale di propagazione. Quindi estrarre la curva di dispersione consiste semplicemente nell'estrarre il valore di K , per ogni frequenza, per il quale si ha il massimo valore di ampiezza nella sezione dello spettro FK; dal valore di K così trovato si calcola la velocità di propagazione dell'onda a quella frequenza.

Osservando come viene costruita una sezione dello spettro REMI mediante la sovrapposizione degli effetti relativi ai microtremori giunti ai ricevitori, si deduce che nel metodo REMI non si deve inseguire il valore massimo della sezione dello spettro FK (come accade con il metodo MASW) altrimenti verrebbe individuato un valore di K inferiore a quello corretto, che porterebbe ad una sovrastima della velocità di propagazione reale. Il valore massimo di ampiezza nella sezione dello spettro REMI è comunque una informazione molto utile poichè è utilizzabile come riferimento per individuare il corretto valore di K , cioè quello legato alla reale velocità di propagazione. In generale si può scegliere il valore di K per cui si rileva una ampiezza della sezione dello spettro FK pari circa all'80% del suo valore massimo (come confermato precedentemente dalla posizione del massimo dello spettro REMI e la posizione relativa alla velocità reale di propagazione).

Utilizzando la scala di colori che viene proposta da **SWAN**, il concetto appena illustrato si traduce nel cercare la curva di dispersione sullo spettro REMI seguendo l'area approssimativamente colorata in giallo a ridosso della transizione tra l'area colma di energia (colorata in rosso) e l'area in cui è presente solo rumore di fondo (colorata in blu).

Le figure seguenti mostrano come può essere effettuata l'estrazione della curva di dispersione da uno spettro REMI.

A differenza del caso MASW, nel caso REMI, si possono estrarre due curve di dispersione: una da associare ai microtremori che si propagano con velocità apparenti positive e una relativa a quelli che si propagano con velocità apparente negativa. Teoricamente le due curve di dispersione ottenute dovrebbero coincidere, ma, a seguito di possibili asimmetrie nelle sorgenti in fase di acquisizione si ha spesso una leggera asimmetria nello spettro che porta infine a piccole disuguaglianze nelle due curve trovate.



Una volta estratta la curva di dispersione, l'elaborazione mediante **SWAN** di dati MASW e REMI coincide, ovvero bisognerà cercare il modello stratigrafico più plausibile, cioè quello che approssima in modo soddisfacente la curva di dispersione sperimentale trovata. In questo caso il modello stratigrafico dovrà essere tale da interpolare contemporaneamente le due curve trovate.

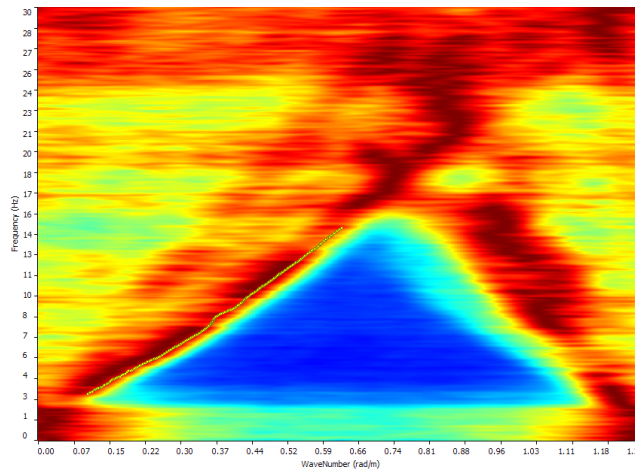
Probabilmente, nel caso in figura, si darà più importanza, a basse frequenze, alla curva di colore verde (estratta analizzando le velocità apparenti negative) che è associata a velocità apparenti minori (quindi, probabilmente, è una migliore indicazione della velocità reale di propagazione). La curva di colore giallo, legata alle velocità apparenti positive, è affetta da un lieve disturbo legato alla non perfetta isotropia delle sorgenti.

Spesso l'incrocio tra le due curve di dispersione estratte con l'analisi della minime velocità apparenti positive e negative, indica un'area dello spettro in cui non è semplice procedere con l'analisi. Nella maggioranza dei casi questo avviene a frequenze abbastanza elevate, legate a lunghezze d'onda del segnale paragonabili alla spaziatura tra i ricevitori. In tal caso la curva, anche se venisse estratta anche oltre la frequenza dell'incrocio delle curve, conterrebbe informazioni non molto accurate. E' quindi tipicamente possibile evitare di analizzare sopra a tali frequenze senza commettere alcun errore. Praticamente si rinuncia (correttamente) a priori ad una analisi accurata della stratigrafia superficiale del terreno, concentrandosi sulle informazioni più in profondità.

La precedente osservazione pone intrinsecamente un limite alla massima frequenza analizzabile sullo spettro. Mentre, per quanto riguarda la minima frequenza da analizzare durante l'analisi, molto spesso questa è determinata approssimativamente dalla frequenza di taglio dei geofoni utilizzati.

In situazioni in cui è invece evidente una maggiore asimmetria tra le direzioni di arrivo dei microtremori, se si decide di proseguire comunque con l'elaborazione, probabilmente si potrà estrarre soltanto una delle due curve di dispersione. È importante ricordare che è da tenere sempre la curva di dispersione (o pezzi di essa) che manifesta velocità apparenti minori. Sarà importante in questi casi anche la sensibilità ed esperienza dell'operatore che esegue l'interpretazione.

Talvolta, se si sospetta già in cantiere che l'ipotesi di isotropia delle sorgenti non sia soddisfatta, è comunque possibile, in casi abbastanza fortunati, azzardare l'acquisizione di dati REMI. Questo è più facilmente possibile se si riesce ad individuare le direzioni da cui provengono i microtremori più intensi. In tal caso si dispongono i geofoni cercando di puntare la sorgente dei microtremori plausibilmente più intensi. Questa scelta serve a garantire di rilevare le minime velocità apparenti in gioco. Infatti come evidenziato precedentemente la velocità apparente è minima (ed uguale a quella reale) proprio quando l'asse dei geofoni coincide con la direzione di propagazione.



In tal caso inoltre la costruzione della sezione dello spettro REMI non segue più rigorosamente il principio descritto precedentemente dato che i contributi dalle varie direzioni non si sommano più con gli stessi pesi. Di conseguenza si ha, con questa configurazione, che il massimo valore della sezione dello spettro REMI si avvicinerà molto al reale valore della velocità reale. Segue quindi che il metodo empirico per l'estrazione della curva di dispersione descritto precedentemente, che suggeriva di individuare la curva intersecante l'80% del valore massimo della sezione (frequenza per frequenza) non è più corretto. Tale metodo andrebbe cioè modificato alzando tale percentuale al 90-95% durante la trattazione dei microtremori più intensi. Mentre tale percentuale sarà ridotta notevolmente durante l'analisi della curva di dispersione associata a velocità apparenti opposte, dove il segnale probabilmente sarà molto debole. Vedi esempio in figura.

Rimane comunque sempre fortemente consigliabile acquisire anche dei dati MASW ogni volta che si acquisiscono dati REMI. Questi saranno sempre un'utile ed economica informazione aggiuntiva importante per aiutare l'operatore durante l'interpretazione dei dati REMI.