



Progetto S6 – Data base dei dati accelerometrici italiani relativi al periodo 1972-2004

Responsabili: Lucia Luzi (INGV-MI) e Fabio Sabetta (DPC-USSN)

TASK 2 - Deliverable 3

Processamento del dato accelerometrico

A cura di

Lucia Luzi, Francesca Pacor, Gianlorenzo Franceschina, Dino Bindi (UR1)

Fabio Sabetta (UR4)

Giuliano Milana (UR3)

INDICE

1. INTRODUZIONE AL PROCESSAMENTO DEL DATO ACCELEROMETRICO	3
1.1 CONTROLLO DELLE ALTE FREQUENZE	4
1.2 CONTROLLO DELLE BASSE FREQUENZE	4
1.2.1 Linea di base	4
1.2.2. Filtraggio	5
2. LINEE GUIDA PER IL PROCESSAMENTO DEL DATABASE ACCELEROMETRICO ITALIANO	5
2.1 Pre-processamento del dato	5
2.2. Processamento del dato analogico	6
2.3. Processamento del dato digitale	7
2.4. Parametri ingegneristici	7
3 BIBLIOGRAFIA	8
4. ALLEGATO 1	9

1. INTRODUZIONE AL PROCESSAMENTO DEL DATO ACCELEROMETRICO

Le registrazioni accelerometriche, per diverse ragioni legate alle caratteristiche dello strumento e all'elaborazione del segnale, contengono certo livello di "rumore" ed il processamento del segnale serve ad ottimizzare il bilanciamento tra segnale e rumore. L'obiettivo del presente documento è quello di fornire uno schema delle procedure richieste per l'elaborazione del dato accelerometrico ai fini del suo utilizzo ottimale.

Prima di ogni approfondimento va comunque puntualizzato che non esiste una soluzione univoca e ottimale che possa essere applicata in qualsiasi condizione perché le procedure da adottare dipendono sempre dalle caratteristiche dello strumento e del segnale considerato e quindi esisterà sempre una componente soggettiva nella scelta delle operazioni e dei parametri (Boore and Bommer, 2005).

La banca dati accelerometrica italiana si compone di segnali registrati da strumenti analogici, in genere antecedenti il 1997, e strumenti digitali, che necessitano diverse procedure di processamento.

Gli accelerogrammi registrati da strumentazione analogica presentano in generale tre elementi critici:

- 1) gli strumenti operano in *stand-by* e vengono attivati al superamento di una soglia prefissata di accelerazione, per cui il segnale può non contenere i primi arrivi (es. onde P);
- 2) la frequenza propria degli strumenti generalmente non supera i 25Hz;
- 3) le tracce sono registrate su pellicola fotografica, e devono essere ingrandite e digitalizzate in modo manuale o automatico (o misto) per poter essere utilizzate.

L'effetto del "rumore" in bassa frequenza presente nelle tracce è maggiormente evidente nel momento in cui le tracce originali vengono integrate. Spesso si osservano valori di spostamento irrealistici che sono in parte dovuti alle condizioni al contorno, come il mancato inizio delle tracce di spostamento o di velocità al valore 0 generato dal trigger, alle caratteristiche della linea di base, all'imperfezione dovuta alla digitalizzazione o a movimenti laterali della pellicola durante la registrazione dell'evento.

Le registrazioni effettuate da strumenti digitali, non presentano gli svantaggi elencati per le registrazioni analogiche. Esse generalmente contengono anche parte della traccia che precede l'evento ("*pre-event memory*"), gli strumenti possiedono una frequenza propria superiore alle frequenze di interesse ingegneristico (50 Hz), gli intervalli di campionamento sono elevati (es. 200 pt/s) e la digitalizzazione del segnale viene effettuata in maniera automatica attraverso un convertitore A/D interno allo strumento. Malgrado ciò non sono immuni da "errori".

L'effetto della "non linearità" della linea di base è comunque presente e ciò risulta evidente integrando il segnale non corretto. Sebbene il segnale che precede e segue l'evento sia contenuto nella traccia, spesso non è condizione sufficiente a discriminare il rumore in bassa frequenza, poiché il rumore è contenuto nel segnale stesso (Boore and Bommer, 2005).

Oltre agli "errori" più comuni elencati per le registrazioni analogiche e digitali, esistono altri tipi di "errore" non associabili al rumore contenuto nel segnale, che vengono denominati *errori non-standard*, rappresentati da:

- picchi isolati o "spuri", e cioè valori anomali di accelerazione
- traslazioni (shift) della linea di base

Di seguito vengono elencate le procedure più comunemente utilizzate per il processamento del segnale accelerometrico, al fine di ottimizzare il bilanciamento tra segnale e rumore, separando le operazioni per il trattamento del segnale in alta e bassa frequenza.

1.1 CONTROLLO DELLE ALTE FREQUENZE

Il controllo delle alte frequenze deve essere effettuato soprattutto per le registrazioni provenienti da strumenti analogici, dove si verificano distorsioni di ampiezza e fase per le componenti del moto con frequenze prossime o maggiori della frequenza strumentale (20-25 Hz). La correzione della risposta strumentale viene generalmente effettuata attraverso la convoluzione del segnale con la funzione di trasferimento dello strumento. Questa procedura è necessaria soprattutto per strumenti con frequenze proprie piuttosto basse (inferiori ai 20 Hz). Il risultato di questa operazione può determinare una eccessiva amplificazione alle alte frequenze, per cui deve essere successivamente applicato un filtro passa-basso per rimuovere il rumore in alta frequenza.

1.2 CONTROLLO DELLE BASSE FREQUENZE

Il processamento per il controllo del contenuto in bassa frequenza può essere effettuato tramite la rimozione della linea di base o applicando dei filtri passa alto.

1.2.1 Linea di base

Una delle cause principali del rumore in bassa frequenza è dovuta alla irregolarità della linea di base del segnale che è la causa delle velocità e degli spostamenti irrealistici che si ottengono integrando una o due volte il segnale accelerometrico non processato.

L'effetto della linea di base può essere rimosso attraverso un "fit" lineare o utilizzando polinomi di diverso ordine. La rimozione della linea di base può inoltre essere impiegata per calcolare lo spostamento permanente del terreno.

La tecnica migliore consiste nell'adeguare in sequenza i tratti della traccia di velocità, ottenuta per derivazione del dato non corretto, ad una retta e nel sottrarre, nel tratto di accelerazione corrispondente, il gradiente della retta ("*multi-segmented baseline correction*").

Esistono anche tecniche più complesse che adattano la derivata prima del dato non corretto a polinomi di secondo grado o superiore (Graizer, 1979; Iwan et al., 1985; Boore, 2001; Zhu, 2003).

In ogni caso, la rimozione della linea di base equivale all'applicazione di un filtro passa alto di frequenza passante sconosciuta.

Uno dei possibili vantaggi dell'aggiustamento della linea di base è che la traccia di spostamento può assumere un livello costante alla fine del segnale che può rappresentare lo spostamento permanente verificatosi in prossimità della faglia. Questo tipo di spostamento non può essere ottenuto tramite applicazione di filtri passa alto. Tuttavia vi sono pochissimi casi in cui gli spostamenti permanenti ottenuti in questo modo siano stati confermati da osservazioni indipendenti e le procedure di correzione della linea di base sono fortemente dipendenti dai parametri utilizzati (Boore and Bommer, 2005). Inoltre va sottolineato che deformazioni permanenti del terreno si verificano generalmente solo in condizioni di *near field* e per magnitudo superiori a 6.5, condizioni che raramente si verificano per i dati italiani.

1.2.2. Filtraggio

La procedura più utilizzata e anche più efficace e meno soggettiva per rimuovere il rumore alle basse frequenze è il filtraggio passa-alto (Boore and Bommer, 2005).

Di solito vengono eliminate le frequenze al di sotto delle quali il rapporto tra segnale e rumore ha un valore troppo basso per essere considerato accettabile. La transizione tra la frequenza passante e le frequenze che si vogliono eliminare non deve essere troppo brusca, al fine di evitare la presenza di oscillazioni dovute alla risposta del filtro. Per questo l'ordine del filtro o la pendenza della rampa (fattore di *roll-off*) devono essere selezionate in modo accurato.

Un'ulteriore selezione va effettuata tra i filtri causali e acausali, il cui fattore discriminante è lo spostamento causato nello spettro di fase del segnale. I filtri causali alterano lo spettro di fase della forma d'onda per mantenere i corretti tempi di arrivo di ogni frequenza, ed il risultato è la dipendenza dalla frequenza d'angolo del filtro, anche a frequenze più elevate della frequenza passa alto applicata. Anche le ordinate dello spettro di risposta elastico ed anelastico possono essere influenzate dall'applicazione del filtro in modo causale.

I filtri acausali non provocano l'alterazione dello spettro di fase, ma generano transienti artificiali a bassa frequenza nel pre- e post- evento che possono essere ridotti introducendo una serie di "zeri" (*zero-pads*) prima e dopo il segnale o eseguendo operazioni di "*tapering*", all'inizio e alla fine del segnale. Questa procedura non può essere applicata ai dati registrati da strumenti analogici, che molto spesso hanno inizio con la fase S.

La frequenza passa alto può essere selezionata seguendo diversi criteri:

- 1) eseguendo un rapporto tra segnale e rumore, dove il rumore per i dati digitali può essere fornito dalla traccia del pre-evento e per i segnali analogici può essere rappresentato dalla traccia fissa. Va comunque tenuto presente che il rumore è presente sia nel pre-evento che durante l'evento;
- 2) osservando la deviazione dal modello teorico dello spettro di Fourier dell'accelerazione (f^2 con singola frequenza d'angolo dipendente dalla magnitudo come proposto da Brune);
- 3) eseguendo un'ispezione visuale delle tracce di velocità e spostamento dopo il filtraggio.

L'utilizzo simultaneo delle tre tecniche sarebbe ottimale. Generalmente viene valutata la deviazione dallo spettro teorico e si controlla che le tracce di velocità e accelerazione corrette siano fisicamente accettabili.

2. LINEE GUIDA PER IL PROCESSAMENTO DEL DATABASE ACCELEROMETRICO ITALIANO

2.1 PRE-PROCESSAMENTO DEL DATO

Le forme d'onda inserite nel database sono state sottoposte ad un pre-processamento per verificare la qualità della registrazione, eliminare gli errori non-standard e ricampionare gli accelerogrammi in modo omogeneo a 200 pt/s.

Anche nel caso del pre-processamento, si effettua una distinzione tra dato digitale e analogico. Le forme d'onda digitali, derivanti da un digitalizzatore con basso range dinamico (es. 12 bits) sono selezionate in base al rapporto tra il picco di accelerazione e la minima

accelerazione campionabile. Se tale rapporto è inferiore a 20 i dati non sono processati. Il valore del picco di accelerazione può essere comunque utilizzato per studi di attenuazione.

Per i segnali digitali e analogici il pre-processamento riguarda:

- 1) registrazioni di eventi multipli
- 2) presenza di “*spikes*” o picchi anomali.

In caso di eventi multipli si duplica la registrazione, il segnale viene suddiviso negli eventi che lo compongono e le caratteristiche ed i parametri degli eventi vengono immagazzinati separatamente all'interno della banca dati.

In caso di presenza di “*spikes*”, questi vengono rimossi adottando una procedura standard che consiste nell'adattamento del picco al valore dei punti più prossimi.

Prima del processamento tutte le registrazioni sono ricampionate a 200 pt/s (0.005 s)

2.2. PROCESSAMENTO DEL DATO ANALOGICO

I dati analogici sono stati registrati soprattutto nel periodo 1972-1993 e rappresentano le registrazioni dei terremoti più severi degli ultimi 30 anni. La maggior parte delle registrazioni su pellicola fotografica derivano da scansione automatica con passo costante di 0.00244 s. Esistono tuttavia alcuni dati digitalizzati manualmente. Il dato analogico nella versione originale è quasi sempre corredato di traccia fissa, che rappresenta il “segnale” derivante dallo scorrimento della pellicola. La traccia fissa non viene sottratta durante il processamento.

Vengono effettuate le seguenti operazioni:

1. sottrazione della media dell'intero segnale
2. adattamento alla linea di base, mediante sottrazione della retta che meglio si adatta all'intero segnale (ottenuta mediante regressione ai minimi quadrati)
3. correzione della risposta dello strumento tramite convoluzione con la curva di risposta (in ampiezza e fase)
4. applicazione del filtro passa alto mediante ispezione visiva dello spettro di Fourier del segnale, valutando la frequenza alla quale si verifica una deviazione dallo spettro teorico (modello omega-quadro ad una frequenza d'angolo)
5. applicazione del filtro passa basso generalmente nel range 25-30Hz

In generale vengono utilizzati filtri acausali che non provocano l'alterazione dello spettro di fase. Nel caso di registrazioni analogiche che hanno inizio in corrispondenza della fase S, per le quali non è possibile aggiungere degli zeri fittizi all'inizio e alla fine del segnale, il tipo di filtro utilizzato è “*Raised Cosine*”. Per i dati analogici che permettono l'applicazione di un “*tapering*” o aggiunta di “*zero-pads*”, viene utilizzato un filtro di tipo “*Butterworth acausale*” di ordine 4.

I valori proposti per il filtro passa basso derivano dal confronto delle tracce registrate simultaneamente da uno strumento analogico e da uno digitale nella postazione di Nocera Umbra (vedi allegato 1). Per strumenti analogici come quello in questione, con frequenze proprie inferiori ai 20Hz, si verifica una forte dipendenza del picco di accelerazione dalla frequenza passa basso e si ottengono valori eccessivamente elevati, rispetto al PGA dello strumento digitale, per frequenze superiori ai 30 Hz. La scelta di fissare la frequenza passa

basso a un valore compreso tra 25 e 30Hz serve a bilanciare da una parte la sottostima dell'accelerazione di picco e dall'altra un'eccessiva amplificazione delle alte frequenze dovuta alla correzione della risposta strumentale.

2.3. PROCESSAMENTO DEL DATO DIGITALE

Per i dati digitali vengono applicate le seguenti correzioni:

1. sottrazione della media dell'intero segnale;
2. correzione per eliminare il rumore a bassa frequenza;
3. filtro passa basso fino ad un massimo di 50Hz.

Viene sottratta la media dell'intero segnale anziché del pre-evento, poiché la maggior parte dei segnali registrati dal 1993 al 2004 non contiene un sufficiente numero di campioni antecedenti l'arrivo della fase P e spesso l'insufficiente campionamento del digitalizzatore non garantisce la registrazione accurata del moto di piccola ampiezza.

Per eliminare il rumore alle basse frequenze viene effettuata la correzione della linea di base mediante sottrazione della retta che meglio si adatta all'intero segnale (ottenuta mediante regressione ai minimi quadrati). Viene applicato poi un filtro passa alto, la cui frequenza è selezionata in base all'ispezione visuale della traccia dello spettro di Fourier in ampiezza, valutando la frequenza alla quale si verifica una deviazione dallo spettro teorico (modello omega-quadro ad una frequenza d'angolo).

Per i dati digitali viene utilizzato un filtro di tipo "*Butterworth acausale*" di ordine 4. con l'applicazione di un "*taper*" di tipo "semi-coseno" all'inizio e alla fine del segnale, selezionando una percentuale di punti contenuta (2-5%).

2.4. PARAMETRI INGEGNERISTICI

Vengono calcolati i parametri ingegneristici più comunemente utilizzati:

- picco di accelerazione
- picco di velocità
- picco di spostamento.
- spettro di risposta elastico in accelerazione (al 5% di smorzamento) per 25 periodi compresi tra 0.03 e 10 sec.
- Intensità di Arias
- "EPA - *Effective Peak Acceleration*" (media dei valori dello spettro di risposta di accelerazione nell'intervallo 0.1-0.5 s divisa per il fattore 2.5)
- durata basata sul contenuto energetico del segnale

3 BIBLIOGRAFIA

Boore D.M. (2001). Effect of the baseline correction on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 1199-1211.

Boore, D.M., Stephens, C.D., Joyner, W.B (2002). Comment on Baseline Correction of Digital Strong-Motion Data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, Earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92 (4): 1543-1560.

Boore D. M., Bommer J.J. (2005). Processing of strong motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dyn. Earth. Eng.* 25, 93-115

Graizer V.M. (1979). Determination of the true ground motion displacement by using strong motion records. *Izvestiya, Phys. Soil Earth* 15, 875-885

Iwan W.D., Moser M.A., Peng C.Y. (1985). Some observations on strong-motion earthquake measurements using digital accelerograph. *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 1225-1246

Zhu L. (2003). Recovering permanent displacement from seismic records of the June 9, 1994 Bolivia deep earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1740

4. ALLEGATO 1

In allegato viene mostrato il processamento di due registrazioni accelerometriche dello stesso evento registrate alla stessa postazione (Nocera Umbra) con uno strumento analogico e uno digitale. Nelle figure 1 e 2 vengono mostrate le tracce corrette per la linea di base. Il picco di accelerazione orizzontale registrato dallo strumento analogico è notevolmente inferiore al picco registrato dallo strumento digitale. In Fig. 3 vengono mostrate le tracce risultanti dall'applicazione di diverse frequenze passa basso alla traccia corretta per la risposta dello strumento (da 25-40Hz). Il picco di accelerazione più simile a quello registrato dallo strumento digitale si ottiene applicando una filtro passa basso compreso tra 25 e 30Hz

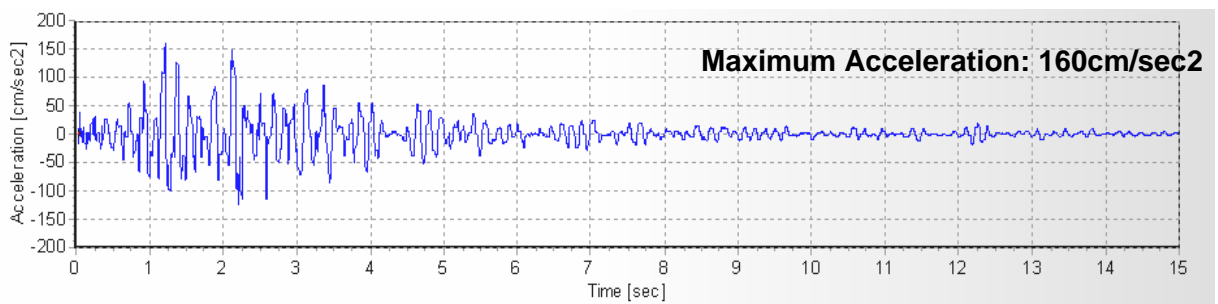


Figura 1 - Registrazione accelerometrica non corretta dell'evento del 3/10/1997 ($M_l=5$, $R_{epi}=10$ km) alla postazione di Nocera Umbra (strumento analogico SMA-1 $f_0=17.6$ Hz).

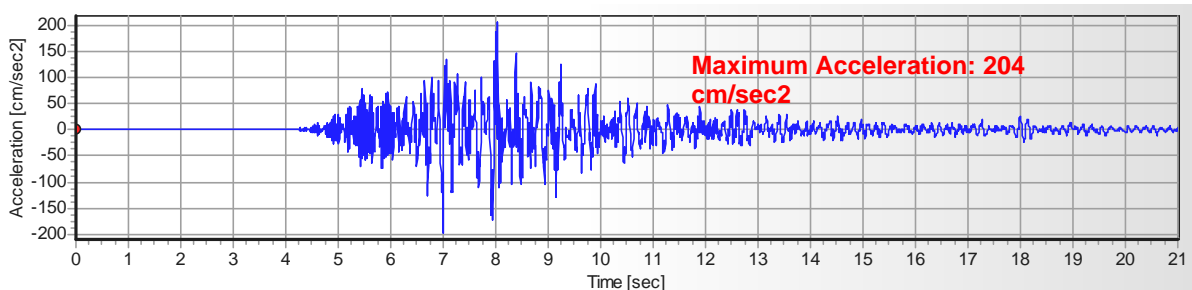


Figura 2 - Registrazione accelerometrica non corretta dell'evento del 3/10/1997 ($M_l=5$, $R_{epi}=10$ km) alla postazione di Nocera Umbra (strumento digitale Episensor $f_0=48.6$ Hz con digitalizzatore ETNA 18 bits).

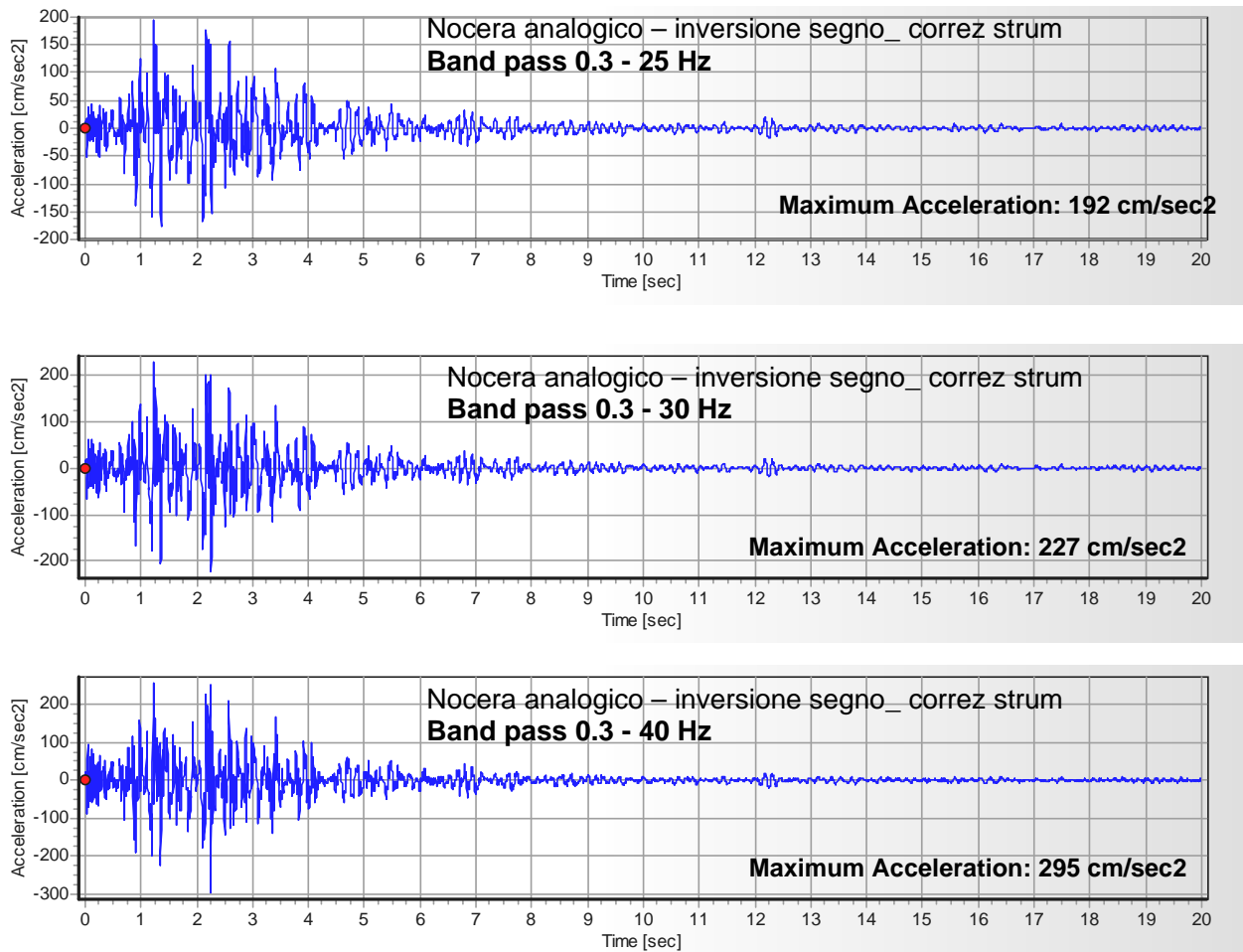


Figura 3 - Esempio di applicazione di diverse frequenze passa basso e relativa variazione del picco di accelerazione, per la registrazione analogica.