

## Proučevanje strukture Zemlje in potresnih virov z modeliranjem valovnih oblik

*Peter Suhadolc*

*Inštitut za geodezijo in geofiziko, Univerza v Trstu, Trst, Italija*

*Sprejeto 13. junija 1986, v končni obliki 2. junija 1987.*

Predstavljeno je modeliranje valovnih oblik opazovanih seizmogramov s pomočjo celotnih sintetičnih signalov izračunanih z vsoto nihanj (Panza, 1985). Obravnavanih je več primerov tako nizkofrekvenčnega kot visokofrekvenčnega modeliranja potresov v Kaliforniji in Italiji. Celotne sintetične seizmograme lahko uporabimo ne le za proučevanje strukture Zemlje in potresnih virov, temveč so lahko zelo koristni tudi za predvidevanje močnega gibanja tal v inženirski seizmologiji.

### *Waveform modelling for the study of the earth structure and seismic sources*

Waveform modelling of observed seismograms using complete synthetic signals obtained with the normal mode summation (Panza, 1985) is presented. Both low and high frequency modelling are discussed with several examples from California and Italy. Complete synthetic seismograms can be used not only to infer the source mechanism or structural parameters, but can be very useful also to predict strong ground motions for engineering purposes.

### 1. Uvod

Uporaba sintetičnih seizmogramov je postala v zadnjih letih običajen del procesa inverzije za proučevanje bodisi strukture Zemlje kot potresnih virov.

V zadnjih dveh desetletjih so bile v seizmologiji razvite razne metode računanja sintetičnih seizmogramov. Po Chapmanu (1978) jih lahko delimo v časovne in spektralne metode glede na to, v katerem vrstnem redu so uporabljene obratne transformacije. Spudich in Archuleta (1986) pa delita različne metode glede na to, če le-te vsebujejo Greenove funkcije, eksplicitno ali implicitno, ali ne.

Glavne metode, ki se dandanes rabijo pa so, ne glede na kakršnokoli klasifikacijo, naslednje: posplošena teorija žarkov ali Cagniard - de Hoop-ova meto-

da (n.pr. Mueller, 1969; Gilbert in Helmberger, 1972; Červený et al., 1977; Chapman, 1978), refleksijska metoda (Fuchs in Mueller, 1971; Kind, 1978), metode direktne numerične integracije ali vsote (valovnih števil ali počasnosti) (n.pr. Apsel, 1979; Kennet, 1980; Bouchon, 1981), diferenčne metode in metode končnih elementov (Smith, 1975; Kelly et al., 1976), metode "celotnega valovanja" (n.pr. Richards, 1973; Choy, 1977) in pa metode vsote nihanj (Liao et al., 1978; Harvey, 1981; Kerry, 1981; Panza, 1985). Med temi metodami obstaja več različic, posebno teorije žarkov, medtem ko drugi pristopi kombinirajo različne metode.

Teoretični seizmogrami, rezultati poznane vhodne strukture in žariščnega mehanizma, omogočajo analizo eksperimentalnih registracij ter ugotovitev parametrov strukture določene regije in/ali žariščnega mehanizma potresov. Podatkov, ki jih lahko izvlečemo iz oblike celotnega valovanja, je vsekakor več kot podatkov o časih prihodov nekaterih faz in največji amplitudi seizmograma. Največja problema, ki ju zasledimo pri modeliranju celotnega valovanja, sta vsekakor preobilica parametrov modela, kar privede seveda do navidez boljšega ujemanja, in pa razlikovanje, kateri del eksperimentalnih podatkov odvisi od žariščnega mehanizma, lokalne strukture, absorpcije in sipanja.

Modeliranje bodisi delov dolgoperiodičnih seizmogramov v daljnem polju (n.pr. Dziewonski et al., 1981) kot akcelerogramov v bližnjem polju (n.pr. Hartzell in Helmberger, 1982) je močno napredovalo v zadnjih letih. Pomanjkanje visokokvalitetnih kratkoperiodičnih seizmogramov pa je zavrlo široko uporabo te metode v primeru krajevnih potresov. Uporaba digitalnih širokopasovnih seizmometrov, ki jih v tem času nameščajo širom po svetu, pa bo omogočila obdelavo tudi takih podatkov.

Namen tega članka je omogočiti kratek pregled modeliranja celotnega valovanja – v različnih frekvenčnih pasovih – s pomočjo sintetičnih seizmogramov, ki so bili izračunani z metodo vsote nihanj (Panza, 1985).

Glavna prednost vsote nihanj, ne glede na možnost uporabe zelo velikega števila plasti, s katerimi lahko natančno modeliramo katerikoli strukturo, je v tem, da uporabimo, za določeno strukturo, časovno zamudni del procedure samo enkrat. Ta metoda je zelo učinkovita v inverziji lokacije in mehanizma žarišča. Pri inverziji strukture Zemlje pa nam je praksa pokazala, da se celo za kratke (okoli 100 km) epicentralne razdalje dajo glavne značilnosti seizmograma modelirati le z osnovnim in malim številom višjih nihanj (Suhadolc in Panza, 1985). Ko se na tak način določijo glavne značilnosti modela Zemlje, lahko model bolj natančno determiniramo s pomočjo sintetičnih signalov, ki jih računamo z vsoto vseh nihanj ki so prisotna v določenem frekvenčnem pasu. Za vertikalno in radialno komponento seizmogramov, seštevamo Rayleighova nihanja, za transversalno komponento pa Loveova.

## 2. Teorija

Natančen opis računanja količin v frekvenčnem prostoru in modela prelo-  
ma potresa, ki so potrebni za izdelavo sintetičnega seizmograma z vsoto nihanj

je podan v Panza in Suhadolc (1986), odnosno v Panza, Schwab in Knopoff (1973).

Fourierjevo časovno transformacijo  $j$ -tega Rayleighevega načina nihanja pomika na prosti površini popolnoma elastičnega modela Zemlje pri epicentralni razdalji  $r$  od žarišča lahko zapišemo (Panza, Schwab in Knopoff, 1973)

$$U_r^{DC} = \{ |R(\omega)| \exp(i\phi_0) \} |n| k^{1/2} \exp(-i3\pi/4) \chi(\Theta, h) \varepsilon_0 G \exp(-ikr) / \sqrt{2\pi r} \quad (1)$$

$$U_z^{DC} = (\varepsilon_0 \exp(i\pi/2))^{-1} U_r^{DC}, \quad U_\Theta^{DC} = 0$$

kjer je  $R(\omega)$  Fourierjeva transformacija časovne funkcije ekvivalentne točkovne sile,  $n$  je normiran vektor pravokoten na prelomno ravnino z enotami dolžine.

$$\phi_0 = \arg R(\omega) \quad (2)$$

je začetna faza,  $k$  je valovno število,

$$\varepsilon_0 = -u^* / w_0 \quad (3)$$

je eliptičnost – razmerje med vodoravnim in navpičnim pomikom na prosti površini. Faktor  $G$  je določen z

$$G^{-1} = 2cuI_1 \quad (4)$$

kjer je

$$I_1 = \int_0^\infty \rho(z) [u^*(z)^2 + w(z)^2] dz / w(0)^2 \quad (5)$$

in kjer je  $\rho(z)$  gostota. Azimutalna spremenljivost odziva je podana s količino

$$\chi(\Theta, h) = d_0 + i(d_1 \sin\Theta + d_2 \cos\Theta) + d_3 \sin 2\Theta + d_4 \cos 2\Theta, \quad (6)$$

kjer je  $\Theta$  kot med azimutom preloma in smerjo, ki povezuje epicenter in seizmološko postajo;  $h$  je žariščna globina. Količine  $d_i$  ( $i = 0, \dots, 4$ ) so

$$\begin{aligned} d_0 &= \frac{1}{2} \sin\lambda \sin 2\delta B(h), & d_3 &= \cos\lambda \sin\delta A(h), \\ d_1 &= -\sin\lambda \cos 2\delta C(h), & d_4 &= -\frac{1}{2} \sin\lambda \sin 2\delta A(h), \\ d_2 &= -\cos\lambda \cos\delta C(h), \end{aligned} \quad (7)$$

kjer je  $\lambda$  kot med azimutom preloma in srednjim pomikom med obema kriloma preloma,  $\delta$  pa vpadni kot preloma. Dalje je

$$A(h) = -u^*(h)/w_0,$$

$$B(h) = -\left(3 - 4 \frac{\beta(h)^2}{\alpha(h)^2}\right) \frac{u^*(h)}{w_0} - \frac{2}{\rho(h)\alpha(h)^2} \frac{\sigma^*(h)}{w_0/c}, \quad (8)$$

$$C(h) = -\frac{1}{\mu(h)} \frac{\tau(h)}{w_0/c}$$

kjer sta  $\alpha(h)$  in  $\beta(h)$  hitrost  $P$  oziroma  $S$  valov v žariščni globini  $h$ ;  $u^*(h)$ ,  $\sigma^*(h)$ ,  $\tau(h)$  in  $w(\theta)$  pa lastne funkcije v žariščni globini oziroma na prosti površini.

Ko obravnavamo anelastične strukture, postane valovno število kompleksno število:

$$k = (\omega/C_1) - i\omega C_2; \quad (9)$$

tako, da izraz  $\exp(-ikr)$  v enačbi (1) postane

$$\exp(-i\omega r/C_1) \exp(-\omega C_2 r). \quad (10)$$

Faktor  $\exp(-\omega C_2 r)$ , ki predstavlja amplitudno dušenje, je poglavitna posledica, ki jo vnaša anelastičnost. Manjše posledice, ki izhajajo recimo iz kompleksne grupne hitrosti in kompleksnih lastnih funkcij, niso vključene v tem modelu. Menimo, da lahko postanejo važne, ko bo rešen problem obravnave lateralnih variacij. Približno vrednost količin  $C_1$  in  $C_2$  dobimo s pomočjo variacijske metode (Takeuchi in Saito, 1972).

Ko smo za vsako frekvenco sešteli delež vsakega nihanja k enačbi (1), dobimo časovni zapis z obratno Fourierjevo transformacijo.

### 3. Nizkofrekvenčno modeliranje

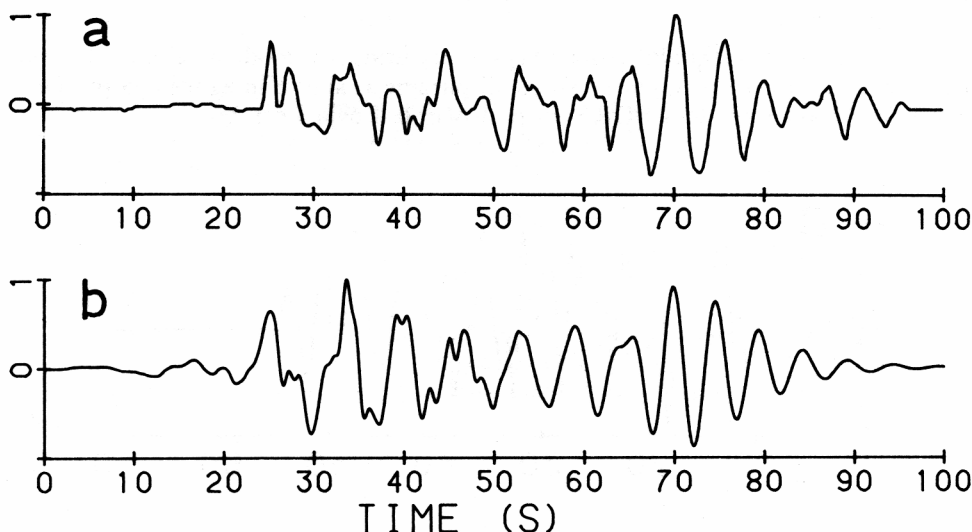
*Potres v Borrego Mountain, Kalifornija, 1968.*

Radialna komponenta zapisa (po Heatonu in Helmbergerju, 1977) tega potresa z magnitudo  $M_L = 6.4$ , ki se je pripetil 9. aprila 1968, na seizmografu tipa Carder z lastno periodo okoli 6 s postaje El Centro (ELC), je prikazan na Sl. 1a. Postaja ELC se nahaja približno 66 km od epicentra potresa.

Strukturni model BORY (Suhadolc in Panza, 1985), ki je bil uporabljen za sintetiziranje seizmograma na Sl. 1b, je prirejena verzija, kar se tiče plasti skorje, modela, ki sta ga predlagala za ta predel Kalifornije Swanger in Boore (1978);

parametri zgornjega plašča pa so povzeti po modelih, ki sta jih za zapadni del Združenih držav predlagala Biswas in Knopoff (1974).

Natančen potek modeliranja tega zapisa je opisan v Suhadolc in Panza (1985) in v Panza in Suhadolc (1986). Naj tu opišemo le glavne etape in rezultate!



Slika 1. a) Radialna komponenta opazovanega zapisa (po Heatonu in Helmbergerju, 1977) na seizmografu tipa Carder postaje El Centro potresa  $M_L = 6.4$  z dne 9. aprila 1968 v hribovju Borrego, Kalifornija, ZDA. Velikost največjega amplitudnega odstopa od ničelne lege znaša približno 7.3 cm.

b) Sintetični seizmogram vsote dveh točkovnih virov. Glej tekst! Enota na vertikalni osi za seizmični moment 1 din cm znaša  $3.6 \cdot 10^{-26}$  cm.

Figure 1. a) Radial component of the observed seismogram (after Heaton and Helmberger, 1977) on the El Centro station displacement meter relative to the  $M_L = 6.4$  Borrego Mountain, California, earthquake of April 6, 1968. Maximum zero-to-peak amplitude is about 7.3 cm.

b) Synthetic seismogram, sum of two point sources (see text). The normalizing factor on the vertical axis, for seismic moment 1 dyn cm, is  $3.6 \cdot 10^{-26}$  cm.

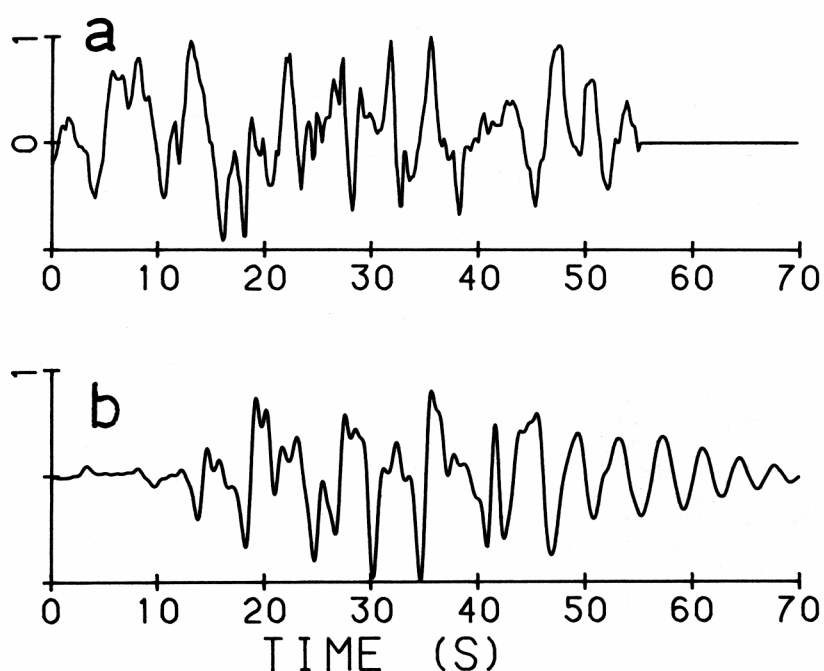
V začetku smo uporabili točkovni vir z žariščnimi parametri, ki sta jih predlagala Burdick in Mellman (1976), in s strukturnim modelom Swangerja in Boora (1978). Za doseg grobe podobnosti z eksperimentalnim zapisom je bilo treba najprej prestaviti žariščno globino od 7 km na 4.5 km ter vzeti v poštev žariščno trajanje 3 s. Vskladitev amplitud kasnejših prihodov z opazovanimi pa je zahtevala rahlo spremembo v debelini nekaterih plasti tik pod prosto površino. Spremembe drugega reda, naprimer v faktorju vpojnosti  $Q$ , niso privedle do značilnejših izboljšav. Na koncu je bilo treba dodati še drugi točkovni vir, v globini 8 km, da so se zmanjšale amplitude prvih prihodov in da se je povečal njihov visokofrekvenčni del.

S primerjavo amplitud sintetičnega seizmograma (izračunanega za seizmični moment 1 din cm) z eksperimentalnimi, sta bila seizmična momenta dveh točkovnih virov določena (v enotah  $10^{26}$  din cm) kot 2.7 in 0.9

*Potres v Brawleyu, Kalifornija, 1976*

Radialna komponenta zapisa na postaji ELC (po Heatonu in Helmbergerju, 1978) tega potresa z magnitudo  $M_L = 4.9$ , ki se je pripetil pri mestecu Brawleyu v Kaliforniji 4. novembra 1976, je prikazana na Sl. 2a. Tudi v tem poglavju bomo opisali le poglobitve rezultate analize. Podrobnosti so podane v Panza in Suhadolc (1986).

Pet najvišjih nizkohitrostnih plasti strukturalnega modela je povzetih po Biehler et al. (1964), medtem ko so ostali parametri skorje in zgornjega plašča v glavnem isti kot v modelu BORY za področje hribovja Borrego.



Slika 2. a) Radialna komponenta opazovanega zapisa (po Heatonu in Helmbergerju, 1978) na seizmografu tipa Carder postaje El Centro potresa  $M_L = 4.9$  z dne 4. novembra 1976 v Brawley, Kalifornija, ZDA. Velikost največjega amplitudnega odstopa od ničelne lege znaša približno 1.4 mm.

b) Sintetični seizmogram vsote treh točkovnih vjrov. Glej tekst! Enota na vertikalni osi za seizmični moment 1 din cm znaša  $2.1 \cdot 10^{-25}$  cm.

Figure 2. a) Radial component of the observed seismogram (after Heaton and Helmberger, 1978) on the El Centro station displacement meter relative to the  $M_L = 4.9$  Brawley, California earthquake of November 4, 1976. Maximum zero-to-peak amplitude is about 1.4 mm.

b) Synthetic seismogram, sum of three point sources (see text). The normalizing factor on the vertical axis, for a seismic moment 1 dyn cm, is  $2.1 \cdot 10^{-25}$  cm.

Najprej smo preizkusili več žariščnih globin okoli hipocentra, ki ga je predlagal USGS, približno 36 km od postaje ELC. Sintetične valovne oblike so se kar dobro ujemale z opazovanimi za točkovni vir na navpičnem desnem horizontalnem prelomu v globini 3.5 km in s trajanjem 1 s.

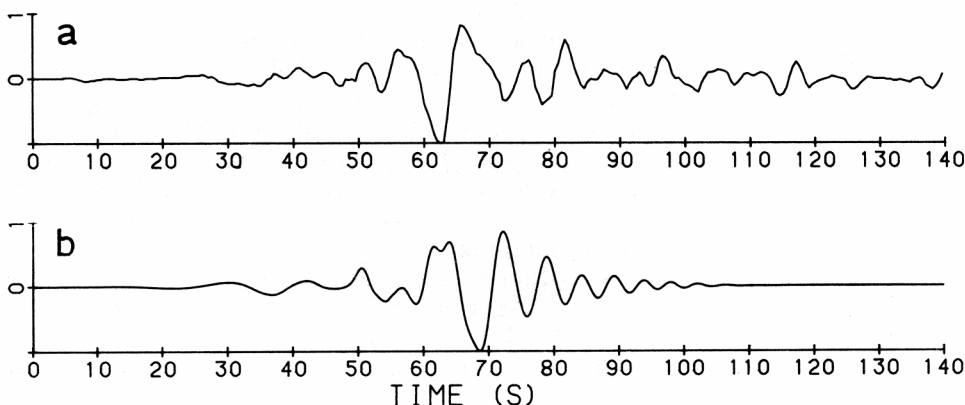
Ker je bilo trajanje tega sintetičnega zapisa prekratko glede na trajanje opazovanega in ker je v le-tem lahko opaziti določeno ponavljanje valovnih oblik, smo dodali še drugi plitek točkovni vir 17 s po prvem. Za vskladitev valovnih oblik v sredini zapisa je bilo potrebno dodati še tretji točkovni vir (v globini 7 km in 14.3 s po prvem).

Končni sintetični zapis je podan v Sl. 2b. Lahko je opaziti, da je prvih 40 s eksperimentalnega zapisa (ki se prične okoli 13 s po izvornem času) relativno dobro sintetiziranih.

#### *Naknadni potres v Irpiniji, Italija, 1980.*

Potres 23. novembra 1980. v Irpiniji, južna Italija, z magnitudo  $M_S = 6.9$  je nastal na prelomu v smeri SZ-JV.

Žariščni mehanizem glavnega potresa je bil določen kot normalni prelom z malo horizontalno komponento (Deschamps in King, 1983; Del Pezzo et al., 1983). Glavnemu potresu je sledila vrsta naknadnih potresov, ki je trajala nekaj mesecev.



Slika 3. a) Vertikalna komponenta opazovanega zapisa dolgoperiodičnega seizmografa postaje Bari (BRT) potresa  $M_L = 4.8$  z dne 26. novembra 1980 ob 06:57 v Irpiniji, Južna Italija. Velikost največjega amplitudnega odstopa od ničelne lege na originalnem zapisu znaša približno 5 mm.

b) Sintetični seizmogram za točkovni vir. Glej tekst! Enota na vertikalni osi za seizmični moment 1 din cm znaša  $1.0 \cdot 10^{-26}$  cm.

Figure 3. a) Vertical component of the observed seismogram recorded on the long-period seismograph at Bari (BRT) station, relative to the  $M_L = 4.8$  Irpinia, southern Italy, earthquake of November 26, 1980 at 6:57. Maximum zero-to-peak amplitude on the original record is about 5 mm.

b) Synthetic seismogram for a point source (see text). The normalizing factor on the vertical axis, for a seismic moment 1 dyn cm, is  $1.0 \cdot 10^{-26}$  cm.

Več teh naknadnih potresov v magnitudnem pasu  $M_L$  od 4.5 do 5.5 je bilo dobro zapisanih na dolgoperiodičnem ( $T_o = 15$  s,  $T_g = 95$  s) seizmografu postaje BRT pri Bariju. Nekaj teh potresov je bilo izbranih zato, da se s pomočjo sintetičnih seizmogramov prouči njihov žariščni mehanizem (Cazzato, 1986).

Eden od teh zapisov, potresa z dne 26. novembra 1980, ob 06:56:57 in z magnitudo  $M_L = 4.8$  je prikazan na Sl. 3a. Odgovarjajoči sintetični seizmogram za točkovni vir je pa podan na Sl. 3b. Pri tovrstnem modeliranju primerjamo opazovani seizmogram s konvolucijo sintetičnega časovnega zapisa pomika z odzivom seizmografa z enakimi karakteristikami kot vertikalni dolgoperiodični seizmograf postaje BRT. Ta procedura je nedvomno boljša od dekonvolucije opazovanega zapisa

#### 4. Visokofrekvenčno modeliranje

##### *Potres leta 1980, v Irpiniji, južna Italija*

Ta potres, ki se je pripetil 23. novembra 1980 z magnitudo  $M_S = 6.9$ , je precej dobro obdelan v literaturi (n. pr. Deschamps in King, 1983; Del Pezzo et al., 1983). Na razpolago je več visokokvalitetnih akceleroogramov tega potresa (Berardi et al., 1981), ki omogočajo analizo v bližnjem polju njegovega poteka loma.

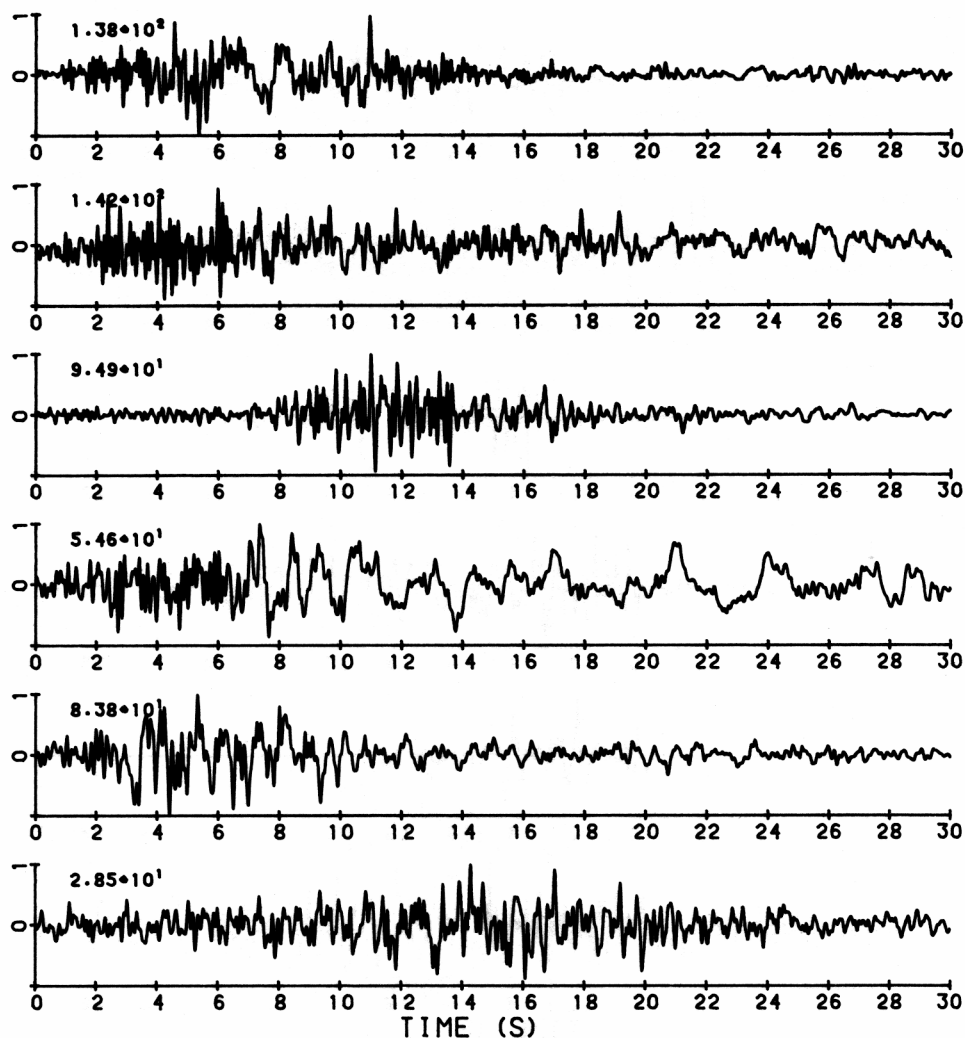
Zapisi vertikalnih komponent akceleroagrafov na postajah Sturno, Calitri, Brienza, Bisaccia, Bagnoli in Auletta so prikazani na Sl. 4. Upoštevamo le prvih 30 s zapisa.

Stopopek, ki je bil uporabljen pri modeliranju valovnih oblik in relativnih amplitud in ki je podrobno opisan v Suhadolc (1986) in Suhadolc et al. (1986), je na kratko naslednji. Prelom, ki ga je orisala prostorska porazdelitev naknadnih potresov, je modeliran z vrsto točk. Za različne žariščne globine in mehanizme izračunamo najprej "elementarne" sintetične akceleroگرامe, neke vrste Greenove funkcije, ki jih povzročajo točkovni viri lokalizirani v teh točkah. Sledi modeliranje začetnega dela eksperimentalnega zapisa z vsoto, z različno težo in izvornim časom, nekaterih od "elementarnih" sintetičnih zapisov. Postopno se nato dodaja še druge "elementarne" zapise, ki modelirajo še preostali del opazovanj.

Sintetični akceleroagrami, ki smo jih na tak način dobili in ki odgovarjajo opazovanim na Sl. 4, so prikazani na Sl. 5. Ker imamo opravka s frekvencami do 10 Hz, lahko pričakujemo, da bomo valovne oblike in amplitude le grobo modelirali. Izgleda namreč, da za frekvence višje od 2 do 3 Hz, zapisi bližnjih postaj akceleroografskega omrežja niso dobro korelirani (Bolt, 1986).

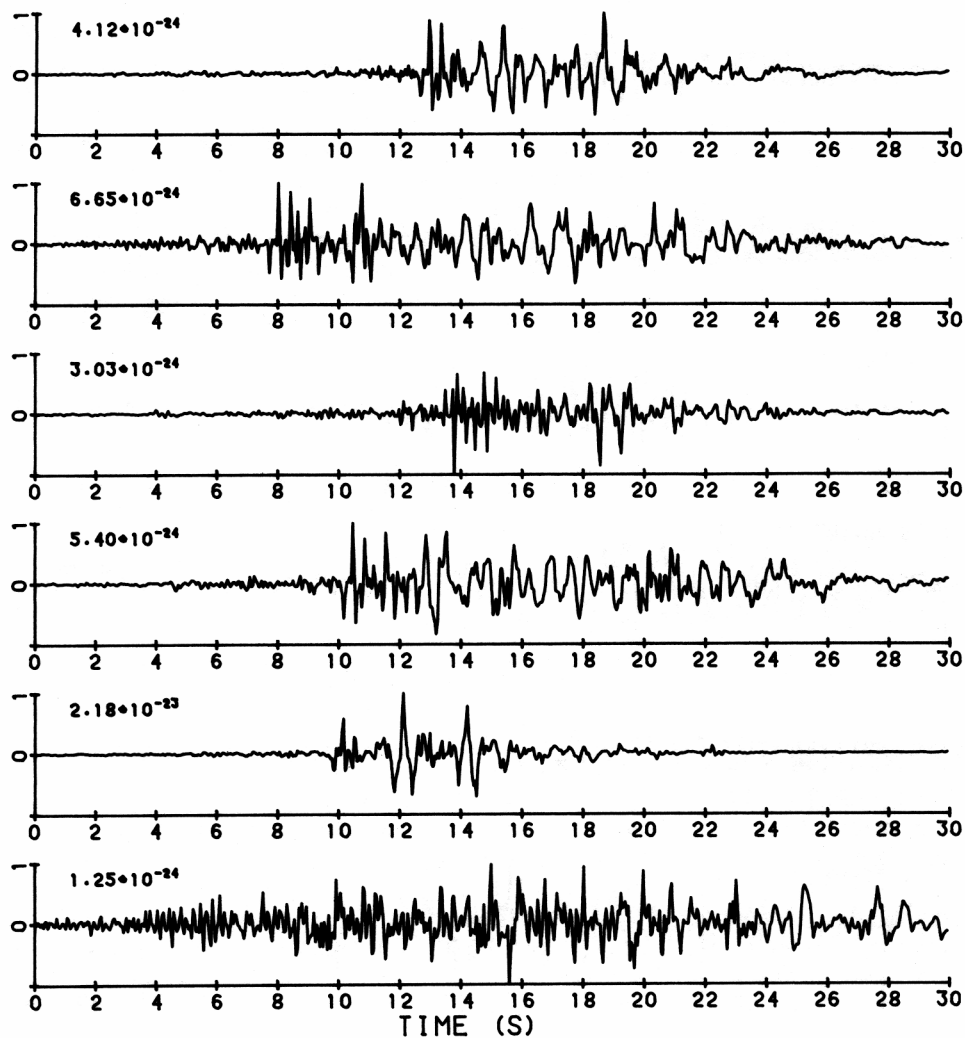
Proces loma, ki ga lahko izpeljemo iz gornjega modeliranja – časovno prostorskega zaporedja aktiviranja točkovnih virov – predpostavlja, da je bila največja energetska sprostitve v globini okoli 17.5 km. Lom se je nato postopno razširil bilateralno proti površini in se ustavil nekaj kilometrov pod njo.





Slika 4. Opazovani zapisi, filtrirani s filtrom Gaussovega tipa z najvišjo frekvenco 10 Hz, vertikalne komponente akcelerogramov potresa  $M_S = 6.9$  z dne 23. novembra 1980 v Irpiniji, južna Italija. Zapisi se nanašajo (od zgoraj dol) na postaje Sturno, Calitri, Brienza, Bisaccia, Bagnoli in Auletta. Izvor na časovni osi ne sovpa z izvornim časom potresa. V levem zgornjem kotu vsakega zapisa je označena enota (v  $\text{cm/s}^2$ ) na vertikalni osi.

Figure 4. Observed vertical component accelerograms, filtered with a Gaussian filter having a 10 Hz cutoff frequency, relative to the  $M_S = 6.9$  Irpinia, southern Italy, earthquake November 23, 1980. The traces, from top to bottom, have been recorded at the stations Sturno, Calitri, Brienza, Bisaccia, Bagnoli and Auletta. The origin on the time axis does not coincide with the earthquake origin time. The number in the upper left corner of the each trace is the normalizing factor (in  $\text{cm/s}^2$ ) of the vertical axis.



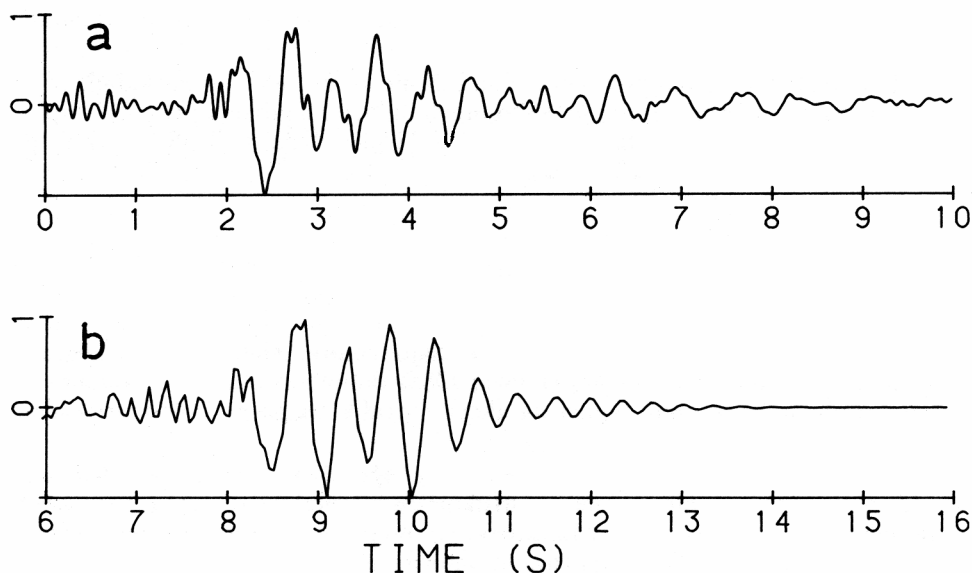
Slika 5. Sintetični akcelerogrami, vertikalna komponenta zapisa, za vsoto več točkovih virov. Glej tekst! Zaporedje postaj kot v Sl. 5. Izvor na časovni osi sovpada z izvoznim časom potresa. V levem zgornjem kotu vsakega zapisa je označena enota ( $\text{cm/s}^2$ ) na vertikalni osi za seizmični moment 0.3 din cm.

Figure 5. Synthetic vertical component accelerograms, sums of several point sources (see text), corresponding to the ones of Fig.4 (the stations are in the same order). The origin on the time axis coincides with the earthquake origin time. The number in the upper left corner of each trace is the normalizing factor (in  $\text{cm/s}^2$ ) of the vertical axis, for a seismic moment 0.3 dyn cm.

*Naknadni potres 11. septembra 1976. v Furlaniji.*

11. septembra 1976 je ob 16:35 prišlo do naknadnega potresa z magnitudo  $M_L = 5.6$  v Furlaniji. Njegov žariščni mehanizem ni dobro opredeljen (Lyon-Caen, 1980) in lahko sklepamo le, da je podoben tistemu glavnega potresa 6. maja 1976: narivni prelom s proti S obrnjeno prelomno ploskvijo in z zelo majhnim vpadnim kotom. Podoben mehanizem predlagata za ta potres tudi Slejko in Renner (1984) in ga postavljata v globino 3.7 km.

Potres je zabeležilo več akceleroografskih postaj (CNEN- ENEL, 1977). Vertikalna komponenta zapisa postaje Buia, filtrirana z filtrom Gaussovega tipa z najvišjo frekvenco 10 Hz, je prikazana na Sl. 6a. Postaja Buia leži v furlanski nižini, za katero je bil predlagan strukturalni model FRIUL7A (Panza in Suhadolc, 1986).



Slika 6. a) Vertikalna komponenta zapisa, filtriranega s filtrom Gaussovega tipa z najvišjo frekvenco 10 Hz, akceleroografa na postaji Buia naknadnega potresa  $M_L = 5.6$  z dne 11. septembra 1976 v Furlaniji, Italija. Izvor časovne osi ne sovpa da z izvornim časom potresa. Velikost največjega amplitudnega odstopa od ničelne lege znaša približno 91  $\text{cm/s}^2$ .

b) Sintetični akceleroogram vsota treh točkovnih virov. Glej tekst! Enota na vertikalni osi za seizmični moment 1 din cm znaša  $5.8 \cdot 10^{-22} \text{ cm/s}^2$ . Izvor časovne osi sovpa da z izvornim časom potresa.

Figure 6. a) Vertical component accelerogram, filtered with a Gaussian filter having a 10 Hz cutoff frequency, recorded at the station Buia and relative to the September 11, 1976  $M_L = 5.6$  aftershock in Friuli, Italy. The origin on the time axis does not coincide with the earthquake origin time. Maximum zero-to-peak amplitude is about 91  $\text{cm/s}^2$ .

b) Synthetic accelerogram, sum of three point sources (see text). The normalizing factor on the vertical axis, for a seismic moment 1 dyn cm, is  $5.87 \cdot 10^{-22} \text{ cm/s}^2$ . The origin on the time axis coincides with the earthquake origin time.

Več sintetičnih seizmogramov je bilo izračunanih na podlagi žariščnih parametrov, ki smo jih dobili v literaturi. Eksperimentalno valovno obliko smo lahko dobro oblikovali le, ko smo točkovni vir postavili zelo plitko (Suhadolc, 1986). Uporabljeni parametri so : epicentralna razdalja 17 km, globina 0.5 km, azimut  $270^\circ$ , vpadni kot  $24^\circ$ , kot srednjega pomika  $75^\circ$ . Podobnost med opazovanimi in teoretičnimi valovnimi oblikami močno izboljšamo, če vzamemo v poštev vsoto treh takih točkovnih virov z utežjo 0.4, 1.0, 0.8 ter izvornimi časi pomaknjenimi za 0 s, 0.6 s, in 1.5 s. Odgovarjajoči sintetični akcelerogram je prikazan na Sl. 6b. Seizmični moment treh virov je približno 0.5, 1.3 in 1.0 (v enotah  $10^{23}$  din cm).

Iz tega modeliranja lahko sklepamo naslednje. Izgleda, da je akcelerogram povzročil bodisi zelo plitek kompliciran vir ali pa se je lomitveni proces pričel v globini in se razširil skoraj do proste površine. Druga hipoteza je tehtnejša, če pomislimo na relativno veliko magnitudo tega potresa. Ob površini se je lomitveni proces verjetno počasi ustavljal in pri tem oddal več ustavljajnih faz, ki so povzročile z svojim širjenjem v površinskih sedimentarnih plasteh prevladujoči del zapsanega signala.

Izsledki, ki jih lahko povzamemo za inženirske potrebe, so naslednji: če se objekti nahajajo na sedimentih, je lahko prevladujoči del gibanja pri potresu posledica širjenja v sedimentarnih plasteh valov, ki jih vzbujajo ali plitki viri ali pa ustavljajne faze lomitvenega procesa.

## 5. Zaključki

Prikazali smo z več primeri, kako dajo celotni sintetični seizmogrami izračunani z metodo vsote nihanj (Panza, 1985) dobre rezultate pri modeliranju opazovanih valovnih oblik bodisi na akcelerografih ali pa na dolgoperiodičnih seizmografih.

Celotne sintetične seizmograme lahko uporabimo ne le za določitev žariščnega mehanizma ali parametrov strukturalnega modela, temveč tudi za predvidevanje močnega gibanja tal v inženirski seizmologiji in v analizah seizmičnega tveganja. Ko so bile enkrat opazovane valovne oblike zadovoljivo modelirane, lahko uporabimo dobljene podatke o lomitvenem procesu in primerne podatke o lokalni strukturi, da predvidimo z dokajšnjim realizmom močno gibanje tal na katerikoli lokaciji. Na ta način lahko vključimo realistične modele lomitvenega procesa v tovrstno računanje in lahko postopoma opuščamo empirično določene zakone spreminjanja pospeška tal z magnitudami in razdaljami.

Da lahko računamo z visokorealističnimi procesi lomitve in modeli strukture Zemlje, moramo upoštevati tudi lateralne heterogenosti Zemlje. Raziskave o tem problemu so v teku (Gregersen et al., 1986).

### Zahvale

Rokopis je kritično pregledal prof. G. F. Panza, kateremu sem hvaležen za pripombe in opozorila. Prav tako se zahvaljujem prof. A. Volčiču za pomoč pri uporabi slovenske terminologije.

Ta članek je bil predstavljen na "Simpoziju o opazovanjih in modeliranju v geofiziki", Zagreb, Jugoslavija, 11-13 junij 1986.

Študijo so finančno podprli naslednji skladi: sklad CNR (italijanski državni center za raziskave) št. 86.00666.05, 40% sklad MPI (ministrstvo za izobraževanje) in ENEA (državni italijanski zavod za alternativne energije) pogodba št. 16094.

### Bibliografija

- Apsel, R.J. (1979): Dynamic Green's functions for layered media and applications to boundary-value problems. Ph.D. thesis, University of California at San Diego.
- Berardi, R., A. Berenzi in F. Capozza (1981): Terremoto Campano-Lucano del 23 novembre 1980: registrazioni accelerometriche della scossa principale e loro elaborazioni. Tech. Rept. CNEN-ENEL, Rome, Italy.
- Biehler, S., R.L. Kovach in C. R. Allen (1964): Geophysical framework of the northern end of the gulf of California structural province. V: Marine geology of gulf of California, T. Van Andel and G. Shor, editors, Am. Assoc. Petrol. Geologists Mem., 3, 126-196.
- Biswas, N.N. in L. Knopoff (1974): The structure of the upper mantle under the United States from the dispersion of Rayleigh waves. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 36, 515-539.
- Bolt, B.A. (1986): Osebno sporočilo.
- Bouchon, M. (1981): A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959-971.
- Burdick, L.J. in G.R. Mellman (1976): Inversion of the body waves from the Borrego Mountain earthquake to the source mechanism. Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1485-1499.
- Cazzato, E. (1986): Studio di aftershocks del terremoto Campano - Lucano del 23-11-1980 col metodo dei sismogrammi sintetici. Tesi di laurea, University of Bari.
- Červený, V., I.A. Molotkov in I. Pščenčík (1977): Ray method in seismology. Karlová univerzita, Praha.
- Chapman, C.H. (1978): A new method for computing synthetic seismograms. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 54, 481-518.
- Choy, G.L. (1977): Theoretical seismograms of core phases calculated by frequency-dependent full wave theory, and their implications. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 51, 275-311.
- CHEN-ENEL (1977): Strong motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. Accelerograms from Friuli, Italy, earthquake of May 6, 1976 and aftershocks: part 3. Rome, Italy.

- Del Pezzo, E., G. Iannaccone, M. Martini in R. Scarpa (1983): The 23 November 1980 southern Italy earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 187-200.
- Deschamps, A. in G.C.P. King (1983): The Campania-Lucania (southern Italy) earthquake of 23 November 1980. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **62**, 296-304.
- Dziewonski, A.M., T.-A. Chou in J.H. Woodhouse (1981): Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2825-2852.
- Fuchs, K. in G. Mueller (1971): Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **23**, 417-433.
- Gilbert, F. in D.V. Helmberger (1972): Generalized ray theory for layered sphere. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **27**, 57-80.
- Gregersen, S., G.F. Panza in F. Vaccari (1986): Developments toward computations of synthetic seismograms in laterally inhomogeneous anelastic media. Preprint.
- Hartzell, S. in D.V. Helmberger (1982): Strong motion modelling of the Imperial Valley earthquake of 1979. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 571-596.
- Harvey, D.J. (1981): Seismogram synthesis using normal mode superposition: The locked mode approximation. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **66**, 37-70.
- Heaton, T.H. in D.V. Helmberger (1977): A study of a strong ground motion of the Borrego Mountain, California, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 315-330.
- Heaton, T.H. in D.V. Helmberger (1978): Predictability of strong ground motion in the Imperial Valley: Modelling the M4.9, November 4, 1976 Brawley earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **68**, 31-48.
- Kelly, K.R., W.R. Ward, S. Treitel, R.M. Alford (1976): Synthetic seismograms: a finite difference approach. *Geophysics*, **41**, 2-27.
- Kennett, B.L.N. (1980): Seismic waves in a stratified half space. II. Theoretical seismograms. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **61**, 1-10.
- Kerry, N.J. (1981): The synthesis of seismic surface waves. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **64**, 425-446.
- Kind, R. (1978): The reflectivity method for a buried source. *J. Geophys.*, **44**, 603-612.
- Liao, A.H., F. Schwab in E. Mantovani (1978): Computation of complete theoretical seismograms for torsional waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **68**, 317-324.
- Lyon-Caen, H. (1980): Seismes du Frioul (1976): modèles de source à l'aide de seismogrammes synthétiques d'ondes de volume. Ph.D. thesis, University of Paris VII, July 4, 1980.
- Mueller, G. (1969): Theoretical seismograms for some types of point sources in layered media. Part III: single force and dipole sources of arbitrary orientation. *J. Geophys.*, **35**, 347-371.
- Panza, G.F. (1985): Synthetic seismograms: the Rayleigh waves modal summation. *J. Geophys.*, **58**, 125-145.
- Panza, G.F., F. Schwab in L. Knopoff (1973): Multimode surface waves for selected focal mechanisms. I. Dip-slip on a vertical fault plane. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **34**, 265-278.

- Panza, G.F. in P. Suhadolc (1986): Complete strong motion synthetics. V: Methods in computational physics, ed. B.A. Bolt, Academic Press.
- Richards, P.G. (1973): Calculation of body waves for caustics and tunnelling in core phases. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **35**, 243-264.
- Slejko, D. in G. Renner (1984): La sequenza sismica iniziata col terremoto del 6 maggio 1976 in Friuli. V: Incontro sul tema: "Finalita' ed esperienze della rete sismometrica del Friuli-Venezia Giulia", pp.75-91, Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia, Trieste, 1984.
- Smith, W.D. (1975): The application of finite element analysis to body wave propagation problems. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **42**, 747-768.
- Spudich, P. in R.J. Archuleta (1986): Techniques for earthquake ground motion calculation with applications to computational physics, ed. B.A. Bolt, Academic Press.
- Suhadolc, P. (1986): Synthetic accelerograms: case examples from Irpinia and Friuli, Italy. V: Proceedings of the International Symposium on "Engineering Geology Problems in Seismic Areas", Bari, Italy, April 13-19, 1986. In press.
- Suhadolc, P. in G.F. Panza (1985): Some applications of seismogram synthesis through the summation of modes of Rayleigh waves. *J. Geophys.*, **58**, 183-188.
- Suhadolc, P., F. Vaccari in G.F. Panza (1986): Strong motion modelling of the rupturing process of the November 23, 1980 Irpinia, Italy, earthquake. Proceedings of the summer school on "Seismic hazard in Mediterranean regions", Strasbourg, July 20 - August 1, 1986.
- Swanger, H.J. in D.M. Boore (1978): Simulation of strong motion displacements using surface wave modal superposition. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **68**, 907-922.
- Takeuchi, H. in M. Saito (1972): Seismic surface waves. V: Methods in computational physics, **11**, B.A. Bolt, ed., pp.217-295, Academic Press.