

| | | |
|-----------|--------|------|
| GEOFIZIKA | Vol. 1 | 1984 |
|-----------|--------|------|

Kratko priopćenje

Proširenje Geigerove metode određivanja položaja žarišta potresa

Mladen Živčić

Geofizički zavod, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Primljeno 19. prosinca 1983.

UDK 550.341

Metoda L. Geigera za određivanje položaja žarišta potresa koja se osniva na poznavanju vremena dolazaka seizmičkih valova na seizmološku postaju dobro je poznata i često primjenjivana. U ovom je radu izložen jednostavan postupak za proširenje Geigerove metode. Pokazano je da se jednadžbe pogrešaka mogu tvoriti i iz razlika u vremenima dolazaka pojedinih faza potresa. Na taj je način moguće u postupak određivanja položaja žarišta potresa uključiti i podatke postaja za koje nije poznato točno vrijeme kao i podatke akcelerografa koji, najčešće, rade bez bilježenja apsolutnog vremena. Predloženo proširenje Geigerove metode primjenjivo je i na potrese s početka ovog stoljeća koje često, zbog nepoznavanja točnog vremena, nije bilo moguće instrumentalno locirati.

Extension of Geiger's method for earthquake hypocentre location

The method of L. Geiger for earthquake hypocentre location, based on the knowledge of seismic wave arrival times, is well discussed in seismological literature and widely used. In this paper a simple extension of the method is suggested. It is shown that the error equations could be formed from the arrival time differences of the earthquake phases. In that way it has become possible to include, in the determination of the hypocentre, the data from the stations with poor timing system, as well as the data from the strong motion records which usually operate without the absolute time system. Also, due to the lack of accurate timing, it was often impossible to locate instrumentally earthquakes from the beginning of this century. The presented method is very convenient for relocation of those events.

1. Uvod

Jedan od najšire prihvaćenih principa za određivanje položaja žarišta potresa i vremena nastanka potresa u žarištu sadrži odabir takovih parametara potresa koji će dati najmanja odstupanja opaženih nastupnih vremena valova potresa od, najčešće unaprijed, pretpostavljene teorijske razdiobe. Pri tomu se razmatra jedan od oblika nelinearne regresije kojim se skupu točaka (φ_i , λ_i , t_{ij}), gdje je

φ_i – geocentrična širina i-te postaje,

λ_i – geografska dužina i-te postaje,

t_{ij} – izmjereno (opaženo) nastupno vrijeme j-tog vala potresa na i-toj postaji,

(uobičajeno je da se zbog zanemarivog utjecaja na konačan rezultat nadmorska visina svih postaja izjednači s nulom), pridjeljuje krivulja zadana parametrima φ_0 , λ_0 , h i t_0 gdje je

φ_0 – geocentrična širina epicentra,

λ_0 – geografska dužina epicentra,

h – dubina žarišta,

t_0 – vrijeme nastanka potresa u žarištu.

Ovdje je oblik krivulje, odnosno funkcije $t_j = t_j(\Delta_i, h)$, unaprijed zadan ili parametrima modela kojim se seizmički valovi rasprostiru ili empirijski.

Metodu je originalno iznio L. Geiger 1910. u radu „Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten“ gdje je postupak primjenio na određivanje položaja epicentra i vremena nastanka potresa uz unaprijed odabranu dubinu žarišta. Kasnije je postupak proširen i na određivanje dubine žarišta potresa (Bolt, 1960; Herak i dr., 1982).

Pri tomu se najčešće rabe vremena dolaska longitudinalnog vala na seizmološku postaju. Razlog je u tomu što je to kod dovoljno jakih potresa jedina faza koja se interpretira bez ikakove mogućnosti zabune i, što je, općenito, model kroz koji se seizmički valovi rasprostiru točnije poznat za longitudinalne valove nego za transverzalne.

Problem nastaje pri pokušaju lociranja slabijih potresa kod kojih se događa da seizmograf ne zabilježi prvi nastup longitudinalnih valova, već se kao prvi dolazak očita neka kasnija faza. (Kod slabijih bližih potresa sa žarištem u gornjem sloju Zemljine kore na seizmogramu je obično najizraženija Pg faza dok se Pn često i ne vidi.) Stoga je u takovom slučaju za račun poželjno uzeti i ostale faze potresa čime se povećava broj ulaznih podataka, a time i mogućnost određivanja parametara žarišta potresa uz pogreške manjeg iznosa. Ukoliko su za neku postaju očitana nastupna vremena za dvije ili više faza potresa određivanje položaja žarišta potresa moguće je i s podacima samo tri postaje.

Na području Jugoslavije nalazi se veći broj privremenih seizmoloških postaja sa zadatkom praćenja seizmičke aktivnosti u neposrednoj blizini pojedinih objekata (rudnici, brane, energetska postrojenja i sl.). Zbog smanjenja troškova održavanja te postaje ne održavaju stručno osposobljeni ljudi tako da su kvarovi na njima mnogo češći nego na stalnim seizmološkim postajama. Jedan od najčešćih nedostataka takovih postaja je neredovito kontroliranje stanja ura na postaji. U slučaju mreže od četiri i više takovih postaja taj nedostatak i nije tako bitan jer se potresi, zbog kojih su postaje i postavljene, obično lociraju metodom K. Wadati-a za što poznavanje apsolutnog vremena nije potrebno (Allegretti i dr., 1984; Živčić i dr., 1984).

Zbog relativno malog broja stalnih seizmoloških postaja na području Jugoslavije često je za pouzdano određivanje položaja žarišta potresa neophodno rabiti i podatke privremenih postaja. Za primjenu Wadatijeve metode tad su te postaje, najčešće, previše

udaljene od žarišta (zadovoljavajući rezultati primjenom Wadatijsve metode dobivaju se za epicentre potresa koji su unutar mreže postaja čija udaljenost od hipocentra nije veća od nekoliko desetaka kilometara). Za primjenu Geigerove metode je, međutim, neophodno poznavanje apsolutnog vremena dolaska valova potresa na postaju što često za tu vrst postaja nedostaje. Za tu svrhu podaci takovih postaja postaju stoga neupotreb-
ljivi.

U ovom radu razmatrat će se način na koji je moguće Geigerovu metodu određivanja položaja žarišta potresa proširiti tako da bude moguće rabiti i podatke postaja za koje apsolutno vrijeme nije poznato.

2. Teorijski izvod

Geigerova metoda određivanja parametara žarišta potresa sastoji se u tome da se minimalizira zbroj kvadrata razlika opaženih vremena dolazaka valova potresa na seizmološku postaju i vremena izračunatih za dani model sredstva kroz koje se elastički valovi rasprostiru i za dane parametre žarišta potresa.

Razlika ϵ_{ij} opaženih i računatih nastupnih vremena je

$$\epsilon_{ij} = t_{ij} - (t_o + t_j(\Delta_i, h)) \quad (1)$$

gdje je Δ_i – epicentralna udaljenost i-te postaje dana s

$$\cos \Delta_i = \cos \varphi_i \cos \varphi_o + \sin \varphi_i \sin \varphi_o \cos (\lambda_i - \lambda_o). \quad (2)$$

Razlike ϵ_{ij} su funkcija parametara φ_o , λ_o , h i t_o te se može pisati

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}(\varphi_o, \lambda_o, h, t_o).$$

Poznajemo li približne vrijednosti φ_o' , λ_o' , h' i t_o' parametara žarišta potresa to će razlika opaženih i računatih vremena u nekoj točki u blizini pretpostavljenih približnih vrijednosti biti dana razvitkom funkcije u Taylorov red

$$\epsilon_{ij} = t_{ij} - t_o' - t_j(\varphi_o', \lambda_o', h') - \frac{\partial t_j}{\partial t_o} \delta t_o - \frac{\partial t_j}{\partial \varphi_o} \delta \varphi_o - \frac{\partial t_j}{\partial \lambda_o} \delta \lambda_o - \frac{\partial t_j}{\partial h} \delta h \quad (3)$$

gdje su $\delta \varphi_o$, $\delta \lambda_o$, δh i δt_o razlike između pravih i pretpostavljenih vrijednosti parametara potresa, za koje se pretpostavlja da su dovoljno male da bi se kvadratne i više potencije članova u razvoju mogle zanemariti.

Izrazi za parcijalne derivacije su

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_j}{\partial t_o} &= 1, \\ \frac{\partial t_j}{\partial \varphi_o} &= -\frac{\partial t_j}{\partial \Delta_i} \cos \alpha_i, \\ \frac{\partial t_j}{\partial \lambda_o} &= -\frac{\partial t_j}{\partial \Delta_i} \sin \alpha_i \cos \varphi_o', \end{aligned} \quad (4)$$

gdje je α_i azimut seizmološke postaje u odnosu na pretpostavljeni epicentar potresa mjereno od sjevera u smjeru kazaljke sata.

Račun se sastoji u tomu da se odrede vrijednosti $\delta \varphi_o$, $\delta \lambda_o$, δh i δt_o kao razlike između pretpostavljenih i najvjerojatnijih vrijednosti parametara. Te se vrijednosti odre-

đuju primjenom metode najmanje sume kvadrata odstupanja gdje su jednadžbe pogreške dane kao

$$\epsilon_{ij} = l_{ij} - a_{ij} \delta\varphi_o - b_{ij} \delta\lambda_o - c_{ij} \delta h - d_i \delta t_o, \quad (5)$$

a oznake su

$$\begin{aligned} l_{ij} &= t_{ij} - t'_o - t_j(\varphi'_o, \lambda'_o, h') \\ a_{ij} &= -\frac{\partial t_j}{\partial \Delta_i} \cos \alpha_i, \\ b_{ij} &= -\frac{\partial t_j}{\partial \Delta_i} \sin \alpha_i \cos \varphi'_o, \\ c_{ij} &= \frac{\partial t_j}{\partial h}, \\ d_i &= 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Jednadžbe (3) uz koeficijente (4) vrijede za bilo koju fazu potresa. Pri tomu ista postaja može biti zastupljena i s više faza.

Ukoliko su na k-toj postaji očitane dvije faze potresa, l-ta i m-ta, za tu postaju može se postaviti slijedeća jednadžba pogreške

$$\begin{aligned} \epsilon_{k,lm} = \epsilon_{km} - \epsilon_{kl} &= t_{km} - t'_o - t_m(\varphi'_o, \lambda'_o, h') - \delta t_o - \\ &- \frac{\partial t_m}{\partial \varphi_o} \delta\varphi_o - \frac{\partial t_m}{\partial \lambda_o} \delta\lambda_o - \frac{\partial t_m}{\partial h} \delta h - \{t_{kl} - t'_o - t_l(\varphi'_o, \lambda'_o, h') - \delta t_o\} - \\ &- \frac{\partial t_l}{\partial \varphi_o} \delta\varphi_o - \frac{\partial t_l}{\partial \lambda_o} \delta\lambda_o - \frac{\partial t_l}{\partial h} \delta h, \end{aligned} \quad (7)$$

odnosno

$$\begin{aligned} \epsilon_{k,lm} &= t_{km} - t_{kl} - (t_m - t_l)(\varphi'_o, \lambda'_o, h') - \\ &- \frac{\partial(t_m - t_l)}{\partial \varphi_o} \delta\varphi_o - \frac{\partial(t_m - t_l)}{\partial \lambda_o} \delta\lambda_o - \frac{\partial(t_m - t_l)}{\partial h} \delta h. \end{aligned} \quad (8)$$

Vidljivo je da ovako dobivena jednadžba pogreške ne sadrži vrijeme nastanka potresa, a i apsolutno vrijeme dolaska valova na postaju je eliminirano jer u jednadžbu ulazi samo razlika u vremenima dolazaka različitih faza. Koeficijenti uz nepoznanice $\delta\varphi_o$, $\delta\lambda_o$ i δh su razlike parcijalnih derivacija za pojedine faze.

Uvedu li se oznake

$$\begin{aligned} l_{k,lm} &= t_{km} - t_{kl} - t_m(\varphi'_o, \lambda'_o, h') + t_l(\varphi'_o, \lambda'_o, h'), \\ a_{k,lm} &= -\left(\frac{\partial t_m}{\partial \Delta_k} - \frac{\partial t_l}{\partial \Delta_k}\right) \cos \alpha_k, \\ b_{k,lm} &= -\left(\frac{\partial t_m}{\partial \Delta_k} - \frac{\partial t_l}{\partial \Delta_k}\right) \sin \alpha_k \cos \varphi'_o, \\ c_{k,lm} &= \frac{\partial t_m}{\partial h} - \frac{\partial t_l}{\partial h}, \\ d_k &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

jednadžba pogrešaka je

$$\epsilon_{k, \ell m} = \ell_{k, \ell m} - a_{k, \ell m} \delta\varphi_0 - b_{k, \ell m} \delta\lambda_0 - c_{k, \ell m} \delta h - d_k \delta t_0. \quad (10)$$

Time se došlo do dvije grupe jednadžbi pogrešaka:

- a) jednadžbe pogrešaka za valove potresa čija su apsolutna vremena nastupa poznata:

$$\epsilon_{ij} = \ell_{ij} - a_{ij} \delta\varphi_0 - b_{ij} \delta\lambda_0 - c_{ij} \delta h - d_i \delta t_0, \quad (5)$$

- b) jednadžbe pogrešaka za razlike u vremenima dolazaka pojedinih faza potresa na postaju:

$$\epsilon_{k, \ell m} = \ell_{k, \ell m} - a_{k, \ell m} \delta\varphi_0 - b_{k, \ell m} \delta\lambda_0 - c_{k, \ell m} \delta h - d_k \delta t_0. \quad (10)$$

Budući jednadžbe (5) i (10) sadrže iste nepoznanice $\delta\varphi_0$, $\delta\lambda_0$, δh i δt_0 moguće ih je objediti u jedinstven sustav jednadžbi pogrešaka

$$\epsilon_r = \ell_r - a_r \delta\varphi_0 - b_r \delta\lambda_0 - c_r \delta h - d_r \delta t_0. \quad (11)$$

Iz ovako dobivenih jednadžbi pogrešaka formira se sustav normalnih jednadžbi kao odredbeni za nepoznanice $\delta\varphi_0$, $\delta\lambda_0$, δh i δt_0 . Rješavanje sustava i računanje pogrešaka pojedinih nepoznanica izvodi se na identičan način kao u slučaju sustava formiranog od jednadžbi pogrešaka u nastupnim vremenima, a što je detaljno opisano u navedenoj literaturi (Bolt, 1960; Herak i dr., 1982; Tucker et al., 1968).

Valja naglasiti da u slučaju kad se jednadžbe pogrešaka formiraju isključivo na osnovi podataka o razlikama u vremenima dolaska pojedinih faza potresa (jedn (10)) nije moguće, na ovaj način, izračunati vrijeme nastanka potresa u žarištu. U slučaju da su sve razlike nastupnih vremena pojedinih faza potresa formirane kao razlike u vremenima dolaska transverzalnog Sg i longitudinalnog Pg vala, te uz pretpostavku homogenog ravnog modela Zemljine kore, čitav postupak svodi se na analitički oblik Wadatijeve metode lociranja žarišta blizih potresa (Živčić i dr., 1984) uz unaprijed zadanu vrijednost konstante $c = V_p V_s / (V_p - V_s)$.

3. Zaključak

Metoda L. Geigera za određivanje položaja žarišta potresa zasniva se na usporedbi opaženih apsolutnih vremena dolazaka valova potresa na seizmološku postaju s teorijskim vremenima. U ovom je radu izložen postupak kojim je moguće kod određivanja osnovnih prostorno vremenskih parametara potresa uključiti i podatke o razlikama vremena dolazaka pojedinih faza potresa. Za takove slučajeve nije potrebno poznavanje apsolutnog vremena čime je omogućeno rabljenje većeg broja podataka, a time i veća pouzdanost konačnog rješenja. To se prvenstveno odnosi na podatke privremenih seizmoloških postaja kod kojih su pogreške u održavanju točnog vremena dosta česte kao i na podatke dobivene akceleroigrafima koji, u pravilu, ne sadrže podatak o apsolutnom vremenu. Ovakva proširena Geigerova metoda vrlo je povoljna i za obradu podataka o starijim potresima budući da je zbog lošeg održavanja točnog vremena za mnoge potrese s početka razdoblja instrumentalne seizmologije bilo nemoguće instrumentalno odrediti položaj žarišta.

Literatura

1. Allegretti, I., D. Skoko i M. Živčić (1984), Određivanje osnovnih parametara potresa zamjenom grafičkog postupka K. Wadatiya analitičkim (četiri postaje), this volume
2. Bolt, B. A. (1960), The Revision of Earthquake Epicentres, Focal Depths and Origin Times Using High-Speed Computer, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 3, 433–440
3. Geiger, L. (1910), Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten, *Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse*, Heft 4, 331–349
4. Herak, M., D. Skoko i D. Mišković (1982), Prilagodba Geigerovog postupka za lociranje hipocentra potresa, *Acta Seismologica Iugoslavica*, No. 8, Vol. 8, 1–13
5. Tucker, W., E. Herrin and H. W. Freedman (1968), Some Statistical Aspects of the Estimation of Seismic Travel Times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 4, 1243–1260
6. Živčić, M., I. Allegretti i D. Skoko (1984), Poopćenje analitičkog oblika Wadatiyjeve metode lociranja žarišta blizih potresa, this volume