

MATICOVÁ REALIZACE ALGORITMU LOKALIZACE OHNISEK PORUŠOVÁNÍ V ZATĚŽOVANÝCH VZORCÍCH HORNIN

J. Vilhelm

Universita Karlova Praha, Přírodovědecká fakulta

Abstrakt

Příspěvek se zabývá algoritmem lokalizace ohnisek dějů ultrazvukové emise, které vznikají při laboratorních zatěžovacích experimentech na horninových vzorcích. Je navržena a testována úprava algoritmu Grid Search Metod, která využívá maticové operace, a tak je dosaženo výrazné urychlení výpočtů.

1 Lokace dějů ultrazvukové emise

Při laboratorním studiu porušování zatěžovaných horninových vzorků je možné proces porušování monitorovat prostřednictvím ultrazvukové emise, která doprovází vznik a rozšiřování mikrotrhlin. Ultrazvuková emise je snímána sítí několika piezokeramických snímačů na povrchu vzorku. Na záznamech vlnových obrazů dějů ultrazvukové emise lze identifikovat časy příchodu elastických P vln v prvním nasazení do míst jednotlivých snímačů a z nich je možné určit místo, kde porušení nastalo. V rámci studia horninových vzorků často uvažujeme model prostředí s konstantní rychlostí šíření seismických vln uvnitř objemu vzorku.

Tato úloha je analogická problému určování ohniska zemětřesení v seismologii. Na rozdíl od seismologie však v případě lokace dějů ultrazvukové emise ze zatěžovaného vzorku míváme k dispozici desítky až stovky tisíc zaznamenaných m -tic časů příchodů (m označuje počet časů příchodů, které jsou k dispozici pro lokalizaci jednoho děje), k nimž potřebujeme určit polohu odpovídajícího ohniska. Proto vznikl požadavek na návrh algoritmu, který by byl dostatečně výpočetně efektivní.

Pro lokalizaci ohniska děje lze využít různých algoritmů [1,2]. Jedním z nejstabilnějších se jeví v daném případě algoritmus označovaný jako grid search algorithm. Tento algoritmus spočívá v rozdělení objemu vzorku prostorovou sítí na řadu elementárních objemových útvarů, například tvaru krychle nebo kvádrů. Každému elementu objemu je přiřazen jeden bod (kupř. těžiště). Pro každý takový bod je optimalizací stanoven čas vzniku děje a je určena suma čtverců odchylek časů odpovídajících poloze ohniska v tomto bodě od časů naměřených. Hledané ohnisko daného děje leží v tom bodě objemu tělesa, kde nastane absolutní minimum testovací sumy čtverců. Realizace takového výpočtu vyžaduje mnohonásobné provádění výpočtů v cyklech přes jednotlivé elementy objemu a všechny zaregistrované děje ultrazvukové emise. Při horninových vzorcích například rozměru válce průměru 5 cm a výšce 10 cm a při dělení v síti 2 mm je tak pro každý děj třeba otestovat řádově prvé desetitisíce bodů odpovídající elementárním objemům. Pro výše uvedené počty dějů v desítkách až stovkách tisíců je výpočet realizovaný v cyklech časově značně náročný.

2 Algoritmus lokalizace optimalizovaný pro MATLAB

Realizovaná optimalizace algoritmu spočívá především v nahrazení struktury programu založené na vnořených cyklech realizací algoritmu pomocí matic a s využitím maticových operací. Operace s maticemi jsou v MATLABu optimalizované a jejich provádění je velmi rychlé.

V prvé řadě algoritmus výpočtu potřebuje spočítat pro všechny testované body válcového vzorku teoretické časy příchodů seismických vln do všech snímačů. K tomu je potřebné vytvořit matici kartézských souřadnic všech testovaných bodů. To je nejčastěji realizováno pomocí tří do sebe zanořených cyklů, ale tato operace může být velmi efektivně realizována pomocí funkce *meshgrid*. Ta dovede ze tří vektorů, které obsahují dělení podél tří kartézských os, přímo generovat matici souřadnic všech bodů uvnitř odpovídajícího kvádrů opsaného válci. Redukce na body, které leží uvnitř válce, je opět realizována bez použití cyklického prohledávání. K matici všech bodů kvádrů spočítáme vektor, který tvoří vzdálenosti jednotlivých bodů od osy válce, a pomocí funkce *find* a požadavku, že vzdálenost musí být menší než poloměr, nalezneme indexy bodů uvnitř válce. Po provedení výběru a přeuspořádání získáme matici X všech bodů válce (rozměr $n*3$).

K dispozici máme dále matici S , která obsahuje kartézské souřadnice akustických snímačů na povrchu vzorku. Počet snímačů označíme m , matice S má tedy rozměr $m \times 3$. V konkrétním případě realizovaných měření jsme používali osmi kanálovou registraci, tj. m bylo rovno maximálně osmi. Pro každý snímač bylo provedeno nakopírování jeho souřadnic do matice o n stejných řádcích funkcí *repmat*. Zjištění rozdílu matice X a této matice poskytlo matici diferencí, které jsou základem výpočtu vzdáleností bodů válce a daného snímače. Výpočet kvadrátů těchto rozdílů, jejich součet po řádcích a odmocnění člen po členu je opět realizováno jako maticová operace. Zjištěné vzdálenosti jsou převedeny na časy za předpokladu konstantní rychlosti dělením matice vzdáleností hodnotou rychlosti. Výsledkem je matice T teoretických časů, která má rozměry $n \times m$. Obecně by bylo možné s využitím složitějšího algoritmu generovat matici teoretických časů i v případě modelu s anizotropií rychlosti nebo v rychlostně nehomogenním prostředí. Na další část algoritmu by taková úprava neměla vliv, i když by byla výpočetně podstatně složitější. Pokud nepředpokládáme, že se rychlosti během zatěžování mění, postačí matici T spočítat jednou.

Vlastní proces lokalizace probíhá v cyklu pro jednotlivé naměřené m -tice časů. Pro každou m -tici časů je třeba provést srovnání těchto naměřených časů se všemi časy teoretickými. Srovnávat lze například kvadráty odchylek (lze volit i jiné míry – viz [2]). Vlastní realizace tohoto postupu navíc ještě vyžaduje určení času vzniku děje. Pro jeden konkrétní děj jsou k dispozici naměřené časy t_i , které přinášejí informaci o rozdílech v časech příchodů na jednotlivé snímače, neobsahují informaci o okamžiku vzniku děje. Neznámý čas vzniku děje v ohnisku označíme t_0 . Časy t_i jsou od t_0 posunuty o neznámou konstantu a . Předpokládejme, že ohnisko děje je v bodě F . Pro každý snímač (v bodě S_i) by mělo platit $\frac{FS_i}{v} = t_i + a$ (tj. doba, kterou potřebuje vlna, aby vzdálenost FS_i urazila rychlostí v je rovna naměřenému času t_i , upravenému o konstantní časový posun a). Časový posun a určíme, tak aby

minimalizoval sumu čtverců odchylek: $\sum_{i=1}^m \left(\frac{FS_i}{v} - t_i - a \right)^2 = \min$. Tj. musí být derivace

sumy $\sum_{i=1}^m \left(\frac{FS_i}{v} - t_i - a \right)^2$ podle a rovna 0. Tedy musí být $\sum_{i=1}^m (-2) \cdot \left(\frac{FS_i}{v} - t_i - a \right) = 0$, tj.

$\sum_{i=1}^m \left(\frac{FS_i}{v} - t_i \right) = ma$. Odtud lze vyjádřit časový posun a :

$$a = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{FS_i}{v} - t_i \right) \quad (1)$$

Celkově tedy hledáme pro jednu naměřenou m -tici časů polohu ohniska F tak, že se postupně za F volí všechny body tělesa X_i a hledáme minimum sumy kvadrátů rozdílů:

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{FS_i}{v} - t_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{FS_i}{v} - t_i \right) \right)^2 \quad (2)$$

V bodě, kde nastává minimum výrazu (2), je hledané ohnisko.

Maticová realizace uvedeného výpočtu předpokládá, že z řádkového vektoru naměřených časů t_i pomocí funkce *repmat* vytvoříme n -násobným opakováním matici T_n o n řádcích a m sloupcích. Ve vztahu (1) člen $\frac{FS_i}{v}$ představuje teoretický čas, který potřebuje akustický signál na průchod po dráze mezi ověřovaným ohniskem F (průběžný bod válce) a i -tým snímačem, tj. čas, který je vypočten v matici T . Tento člen tedy může být stanoven jako rozdíl matic $T - T_n$, na který dále aplikujeme součet v řádcích a dělení skalární hodnotou m . Výsledkem je sloupcový vektor A o n řádcích. Pro výpočet testovací veličiny podle rovnice (2) nejprve m -násobným opakováním vektoru A ve směru řádků vytvoříme matici A , která bude mít rozměr $n \times m$. Testovací veličinu (2) můžeme vyjádřit jako rozdíl matic $T - T_n - A$, který dále umocníme na druhou po členech a provedeme sečtení prvků v řádcích. Výsledný sloupcový vektor V má n prvků a prvek, kde nastává minimum vektoru V , odpovídá hledanému ohnisku. Velmi jednoduše lze současně ověřit, zda je takové minimum jen jedno.

Tato maticová modifikace algoritmu grid search může být dále snadno použita i pro upřesňování lokalizace, kdy je k nalezenému ohnisku provedeno v jeho okolí jemnější dělení a v něm je nalezena nová poloha s nejmenší odchylkou sumy čtverců.

Ještě zajímavějším rozšířením algoritmu je modifikace, která se snaží o upřesnění lokace tím, že vynechává ty měřené časy, které po lokalizaci vedou k největší chybě pro daný snímač. Dostatečná rychlost algoritmu umožňuje například vynechávat z osmi snímačů vždy dva a tak mezi sebou porovnávat lokalizace pomocí šesti snímačů z osmi. V tomto případě existuje $\binom{8}{6}$, tj. 28 různých kombinací snímačů, které dávají odlišnou sumu čtverců podle vztahu (2). Je zjevné, že výpočetní náročnost úlohy mimořádně vzrůstá. Z hlediska praktické realizace lokace ohnisek dějů ultrazvukové emise je však významné, že uvedený postup vede k užšímu shlukování ohnisek, které věrohodněji vykresluje proces porušování vzorku.

3 Diskuse a závěr

Byl vytvořen a vyzkoušen efektivní algoritmus metody grid search pro lokalizaci dějů ultrazvukové emise, využívající maticové operace MATLABu. Pro další zefektivnění činnosti lokalizačního programu je možné otestovat, jaký je nejvhodnější poměr mezi dělením objemu při hrubém vyhledávání polohy ohniska uvnitř celého válce a dělením dílčího objemu při upřesňování jeho lokace.

References

- [1] B. L. F. Daku, J. E. Salt, L. Sha, A. F. Prugger. *An Algorithm for Locating Microseismic Events*. Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 2-5, Niagara Falls, Canada, Vol. 4, pp. 2311-2314, 2004.
- [2] M. S. Sambridge, B. L. N. Kennet. *Seismic Event Location: Nonlinear Inversion Using a Neighbourhood Algorithm*. Pure and Applied Geophysics, Birkhauser Verlag, Basel, 2001.

Jan Vilhelm

Universita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Albertov 6, 128 43 Praha 2, email: vilhelm@natur.cuni.cz