

Syntetická seismologie

Vlastislav Červený

Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2

81.00

Jsou popsány metody numerického modelování seismických vlnových polí v nehomogenních elastických prostředích. Hlavní pozornost je věnována numerickému modelování v laterálně nehomogenních strukturách se zakřivenými rozhraními, které hraje velmi důležitou roli v současných geodynamických strukturálních studiích. Jsou diskutovány metody založené na přímém numerickém řešení elastodynamických rovnic a vysokofrekvenční metody asymptotické. Z vysokofrekvenčních metod je popsána zejména metoda gaussovských svazků, která je zobecněním klasických paprskových metod. Metoda gaussovských svazků v sobě spojuje širokou aplikovatelnost metod paprskových a přesnost metod vlnových.

Synthetic seismology

Methods of numerical modelling of seismic wave fields in inhomogeneous elastic media are described. Main attention is paid to numerical modelling in laterally inhomogeneous structures with curved interfaces which play a very important role in recent geodynamical structural studies. Two approaches to this problem are discussed. The first approach is based on the direct numerical solution of elastodynamic equations, the second on the high-frequency asymptotic methods. In the latter case, the main attention is paid to the method of Gaussian beams, a powerful generalization of the ray method. The method of Gaussian beams effectively combines the broad possibilities of the ray method and the accuracy of wave methods.

1. Úvod

Seismické vlny přináší seismologům informace jednak o seismickém ohnisku, jednak o stavbě prostředí, kterým prošly. Jedním z hlavních úkolů teoretické seismologie je rozpracovat metody, které by umožnily tyto informace z naměřených seismogramů získat. Úloha je značně komplikovaná a nejednoznačná. Aby ji bylo možno vůbec řešit, činí se řada zjednodušujících předpokladů jak o mechanismu ohniska, tak i o struktuře prostředí. V úlohách, kde se zajímáme především o fyziku seismického ohniska, se většinou předpokládá, že prostředí je homogenní či že parametry prostředí závisí jen na jedné souřadnici. Naopak v úlohách strukturální seismologie se vesměs uvažuje jednoduchý typ seismického zdroje, např. multipólový bodový zdroj.

Při detailnějším studiu seismického ohniska a struktury zemského nitra se v průběhu posledních deseti let široce užívá numerického modelování seismických vlnových polí. V numerickém modelování se předpokládá známý zdroj a známá struktura zemského nitra a počítají se odpovídající seismogramy v některých bodech prostředí, většinou na zemském povrchu. Srovnáním těchto syntetických seismogramů se seismogramy naměřenými můžeme posoudit, zda uvažovaný zdroj a struktura prostředí vyhovují či nevyhovují naměřeným seismogramům. Systematickým měněním parametrů zdroje a struktury nemůžeme sice dospět k jednoznačnému výsledku, ale můžeme silně omezit třídu přípustných modelů. Metodami numerického modelování seismických vlnových polí se zabývá obor seismologie, pro který se v současné době vžil označení syntetická seismologie.

V tomto článku popíšeme hlavní přístupy k numerickému modelování seismických vlnových polí v laterálně nehomogenních prostředích s komplikovanou strukturou. Budeme pro jednoduchost předpokládat, že vlnové pole je buzeno bodovým zdrojem. Vyzařovací charakteristika bodo-

vého zdroje však může být libovolná. Pro úplnost popíšeme v kap. 2 současné metody numerického modelování seismických vlnových polí pro laterálně homogenní modely Země. Kapitoly 3 až 6 jsou již plně věnovány prostředím laterálně nehomogenním. V kap. 4 popíšeme přímé numerické řešení elastodynamických rovnic pomocí metody konečných diferencí a v kap. 5 a 6 budeme diskutovat vysokofrekvenční asymptotické metody.

V posledních dvou až třech letech byla ve spolupráci čs. a sovětských seismologů a matematiků navržena nová metoda výpočtu seismických vlnových polí založená na rozkladu vlnového pole na gaussovske svazky (viz kap. 6). Zobečňuje klasické paprskové přístupy; paprsky jsou nahrazeny gaussovskými svazky, jejichž efektivní šířka se bod od bodu mění v důsledku difúze, rozšiřování vlnové fronty a odrazů či lomů na rozhraních. V časové oblasti vede uvedený přístup k rozkladu nestacionárního vlnového pole na vlnová klubka, která se šíří podél paprsků. Výhodné vlastnosti vykazují zejména tzv. gaussovská vlnová klubka, která mají gaussovskou obálku jak v prostoru, tak i v čase. Metoda má obecný charakter a může být použita při numerickém modelování jakýchkoliv vlnových polí, nejen vlnových polí seismických.

2. Numerické modelování seismických vlnových polí v laterálně homogenních modelech Země

Efektivní metody numerického modelování seismických vlnových polí (výpočtu syntetických seismogramů) pro prostředí, jehož parametry závisí jen na jedné souřadnici, byly rozpracovány v průběhu posledních 10 až 15 let. Velkou důležitost mají zejména modely radiálně symetr: ké, ve kterých parametry prostředí závisí jen na vzdálenosti od zemského středu. V řadě aplikací, kde se studuje šíření vln v nějaké menší oblasti (nikoliv v celé Zemi), se uvažují modely vertikálně nehomogenní, kde v kartézské souřadné soustavě závisí parametry prostředí jen na hloubce. Numerické modelování v radiálně symetrickém prostředí je poněkud složitější než v prostředí vertikálně nehomogenním, proto si zde všimneme pouze prostředí vertikálně nehomogenního.

Jeden z možných přístupů k výpočtu syntetických seismogramů ve vertikálně nehomogenním prostředí pro případ bodového zdroje je založen na maticovém formalismu. Seismické vlny generované libovolným multipólovým bodovým zdrojem se pomocí Sommerfeldova (či Weylova) integrálu rozloží na rovinné vlny, včetně vln nehomogenních. Celé prostředí se pak simuluje tenkými homogenními vodorovnými vrstvami. Šíření rovinných elastických vln v prostředí složeném z homogenních vodorovných vrstev je možno dobře popsat pomocí maticového počtu. Každé vrstvě je přiřazena jistá matice (4×4 , 5×5 či 6×6 — v závislosti na konkrétní metodě). Prvky této matice obsahují převážně trigonometrické a algebraické funkce mocnosti vrstvy, parametrů prostředí v dané vrstvě (rychlosti podélných a příčných vln a hustoty), frekvence a úhlu mezi normálou k vlnoploše a normálou k rozhraní. Vlnové pole generované libovolnou rovinnou vlnou lze pak v libovolném bodě prostředí získat jistou manipulací matic všech vrstev. Pro bodový zdroj je pak nutno ještě provést Sommerfeldovu (Weylovu) integraci přes všechny rovinné vlny uvedeného integrálního rozkladu. Touto integrací dostaneme kompletní hledané pole. Výpočet se provádí ve frekvenční oblasti, do časové oblasti se přechází pomocí rychlé Fourierovy transformace. Uvedená procedura výpočtu syntetických seismogramů je sice přímočará, ale velmi náročná na strojový čas. Na podobném principu je např. založena metoda předložená západoněmeckými seismology K. Fuchsem a G. Müllerem přibližně před patnácti lety, nazývaná „metodou reflektivity“ (*reflectivity method*). Podrobnosti o metodě je možno nalézt v [1, 2]. Jeden výpočet syntetických seismogramů pro 20 až 30 přijímačů pro realistický model zemské kůry a svrchního pláště popsaný přibližně 50 až 100 vrstvami spotřebuje na počítačích velikosti EC 1040 několik hodin strojového času. (Je nutno spočítat několik miliónů matic 5×5 .) Situace se ještě dále komplikuje tím, že na integrační cestě se vyskytují póly (odpovídající povrchovým vlnám) a jiné singularity. Všechny tyto problémy jsou však současnou výpočetní technikou zvládnutelné a problém numerického modelování seismických vlnových polí buzených multipólovým bodovým zdrojem ve vertikálně nehomogenním prostředí je možno pokládat za vyřešený a numericky realizovatelný. Podobné přístupy je možno použít i v radiálně symetrickém prostředí. Detailní rozbor jednotlivých metod je možno nalézt v [3].

3. Numerické modelování seismických vlnových polí v laterálně nehomogenních prostředích

V současné době se ukazuje, že struktura zemského nitra (přínejmenším jeho povrchových částí) je daleko komplikovanější, než se dříve soudilo. Klasický model zemské kůry sestávající ze dvou či tří téměř paralelních homogenních vrstev je již nutno pokládat za překonaný. Rychlosti šíření seismických vln i hustota se výrazně mění v závislosti na všech třech souřadnicích. Strukturální diskontinuity, na kterých se mění rychlosti a hustota skokem, mají často komplikovaný tvar (blokové struktury, vyklíňující vrstvy, izolovaná tělesa apod.). Právě oblasti se složitou strukturou jsou předmětem intenzivního zájmu geofyziků v geodynamických studiích i při řešení různých prospekčních otázek v nejsvrchnějších částech Země [4].

Problém numerického modelování seismických vlnových polí v laterálně nehomogenních prostředích je značně komplikovanější než pro prostředí laterálně homogenní. Analytická řešení elastodynamických rovnic pro uvedená prostředí známa nejsou a nelze očekávat, že by byla nalezena. Metody rozvinuté pro případ laterálně homogenních prostředí nelze proto v laterálně nehomogenních prostředích použít a je nutno hledat přístupy nové.

Existují tři hlavní směry, ve kterých se syntetická seismologie snaží hledat efektivní metody numerického modelování vlnových polí v laterálně nehomogenních prostředích. První přístup je založen na přímém numerickém řešení elastodynamických rovnic pomocí metody konečných diferencí či konečných prvků. Druhý přístup využívá metod přibližných (např. asymptotické vysokofrekvenční metody). Třetí přístup je založen na metodách perturbačních.

Hlavní uplatnění našly zatím v seismologii první dvě metody, kterých si všimneme podrobněji. Nevylučujeme však, že i metody perturbační najdou v budoucnu v seismologii širší uplatnění. Pro podrobnější popis perturbačních metod viz např. [3].

Metoda přímého numerického řešení elastodynamických rovnic a vysokofrekvenční asymptotické metody se vzájemně nevylučují, právě naopak, všestranně se doplňují. První je velmi vhodná při numerickém modelování nízkofrekvenčních vln v malých modelech prostředí, druhá při modelování vysokofrekvenčních prostorových seismických vln v modelech velkých ve srovnání s vlnovou délkou.

4. Přímá numerická řešení elastodynamických rovnic

V poslední době našly v seismologii uplatnění při řešení některých úloh pro dvoudimenzionální prostředí metody konečných diferencí a konečných prvků. Častěji se používají metody konečných diferencí, a to explicitní schémata. Metodami konečných diferencí lze řešit zejména takové úlohy, kde model prostředí není příliš velký ve srovnání s převládající vlnovou délkou uvažované časové funkce zdroje. Metoda nachází široké uplatnění např. v seismickém mikrorajonování, při studiu vlivu lokálních geologických struktur na kmitání povrchu zemského [5], v seismickém inženýrství, při studiu některých problémů vln povrchových a seismického ohniska. Příklad aplikace metody konečných diferencí v seismickém mikrorajonování je možno nalézt na obr. 6 v práci [6]. Při řešení úloh strukturální seismologie, kde horizontální i hloubkové rozměry modelů přesahují desítky či stovky vlnových délek, metody konečných diferencí uživat nelze.

Metoda konečných diferencí dává vlnové pole jako celek, aniž by se pole matematicky rozkládalo na jednotlivé vlnové skupiny (prostorové vlny podélné a příčné, povrchové vlny apod.). To je zároveň předností i nedostatkem metody. Přednost spočívá v tom, že pole je skutečně kompletní a je jej možno přímo srovnávat s polem naměřeným. Nedostatkem je však fakt, že vlnové pole po stránce fyzikální může být velmi složité a je nutno interpretovat je podobně jako pole naměřené.

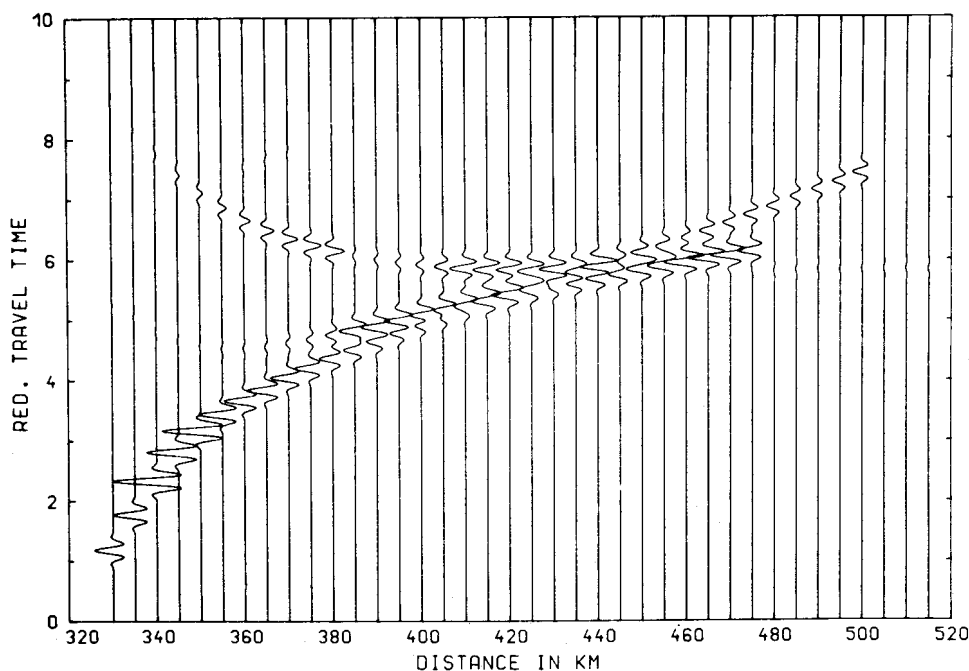
Novým vývojem při numerickém modelování vlnového pole metodou konečných diferencí je metoda „pohyblivých obrazů“ (*movies*), tj. promítání jednotlivých časových hladin na speciálních terminálech v rychlém časovém sledu za sebou. Tento „film“ dává dobrou představu o vzniku a časovém vývoji jednotlivých vlnových skupin. Měl jsem možnost sledovat uvedený vývoj v r. 1981 na dvou zahraničních pracovištích — na *Stanfordské univerzitě* v Kalifornii a v *Océano-*

grafickém ústavu ve Woods Hole, Massachusetts. V obou případech se používal počítač VAX 11 a barevný grafický terminál AED 512. Syntetický „film“ je přirozeně možno přehrávat na terminálu libovolněkrát za sebou a podrobně rozebrat vznik a šíření jednotlivých vlnových skupin. Tento vývoj otevírá nové cesty k numerickému modelování seismických vlnových polí metodou konečných diferencí, vyžaduje však nejmodernější zařízení výpočetní techniky. Je nutno zdůraznit, že nejde jen o nový způsob grafického zobrazení výsledků, ale o principiálně novou metodu studia vlnových polí, která umožňuje řešit řadu úloh, které byly v dřívějším postupu řešitelné jen obtížně či vůbec neřešitelné.

5. Přibližné vysokofrekvenční metody výpočtu seismických vlnových polí

Jak bylo uvedeno výše, při výpočtu seismických vlnových polí ve strukturálních studiích je obtížné užívat metody konečných diferencí, neboť modely jsou příliš velké vzhledem k převládající vlnové délce. Velké uplatnění tu však nalézají zejména různé asymptotické vysokofrekvenční metody.

Nejznámější z asymptotických vysokofrekvenčních metod je metoda paprsková. Pod paprskovými metodami nyní nerozumíme užití klasických představ a principů paprskové optiky, ale asymptotické řešení elastodynamických rovnic (pro vysoké frekvence) s cílem nalézt kompletní vlnové pole (syntetické seismogramy). Paprskové syntetické seismogramy nacházejí v praktických aplikacích široké použití zejména pro velkou obecnost modelů prostředí, pro něž je možno výpočty provádět, i pro vysokou efektivitu práce. Metodika výpočtu paprskových syntetických seismogramů pro laterálně nehomogenní prostředí s nerovinnými rozhraními byla navržena a rozpracována zejména v ČSSR — viz [7–9].



MODEL ZURICH

Obr. 1. Systém paprskových syntetických seismogramů pro model laterálně nehomogenní zemské kůry. Uvedený systém patří do souboru syntetických seismogramů sloužících k prověření interpretačních metod užívaných ve strukturální seismologii. Časová osa syntetických seismogramů je redukováná, redukční rychlost je 8 km/s. Převládající frekvence časové funkce zdroje — 4 Hz (z materiálů [15]).

Syntetické paprskové seismogramy mohou být též prospěšné pro prověření a otestování spolehlivosti současných metod interpretace seismických vlnových polí naměřených ve strukturálně složitých oblastech. Experiment s tímto cílem naplánovala pro rok 1983 Komise pro seismologii řízených zdrojů *Mezinárodní unie geofyzikální a geodetické (CCSS IUGG)*. Uvedená komise řídí v celosvětovém měřítku seismický výzkum struktury zemského nitra pomocí umělých zdrojů (exploze, vibrátory). Pro zasedání, které se konalo v Zürichu v srpnu 1983, byly v r. 1982 všem účastníkům rozeslány systémy syntetických seismogramů pro „tajný“ model zemské kůry délky 550 km, pro odpaly umístěné podél profilu v šesti místech. Desítky světových pracovišť uvedené systémy seismogramů interpretovaly, jako by šlo o seismogramy registrované. Srovnáním výsledků interpretace jednotlivých pracovišť s „tajným“ modelem bylo pak možno učinit závěry o spolehlivosti použitých interpretačních metod. Výpočtem syntetických seismogramů pro uvedenou soutěž pověřila *CCSS IUGG* české seismology. Pro ilustraci je na obr. 1 uveden systém syntetických seismogramů patřící do uvedeného souboru (pro bod odpalu 320 km). Celkový soubor obsahuje 16 obdobných systémů.

Paprskové metody mají však i některá nepříjemná omezení. Jmenujme alespoň dvě z nich: a) Paprskové metody nejsou dostatečně přesné v oblastech, kde se pole paprsků chová singularně. Jde např. o oblasti paprskového stínu, o oblasti kaustik (obálek paprsků) apod., b) paprskové metody jsou velmi citlivé k aproximaci prostředí. Jakékoliv nespojitosti v derivacích rychlosti či drobné oscilace rychlosti způsobují nepříjemné anomálie v amplitudových křivkách jednotlivých vln.

Další potíž při výpočtu paprskových syntetických seismogramů způsobuje samotný výpočet paprsků. Paprsky v laterálně nehomogenním prostředí se počítají numerickým řešením systému obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu (čtyři rovnice v případě dvoudimenzionálních úloh, šest rovnic v případě třídimenzionálních úloh). Počítáme-li paprsek vycházející ze známého zdroje pod zadaným směrem, řešíme úlohu integrace těchto rovnic se zadanými počátečními podmínkami. Taková úloha se řeší lehce, je možno použít řadu známých metod (metoda Rungeva-Kuttova, metoda prediktor-korektor apod.). Při výpočtu syntetických seismogramů však musíme provádět tzv. dvoubodový výpočet paprsků, tj. zjistit paprsek, který prochází dvěma zadanými body (zdroj a přijímač). Z hlediska matematického jde tedy o řešení okrajových úloh, nikoliv úloh počátečních. Dvoubodový výpočet paprsků je značně komplikovanější než výpočet paprsků při zadaných počátečních podmínkách, zejména v třídimenzionálních úlohách.

Některé z výše uvedených nedostatků lze úplně či částečně odstranit různými modifikacemi paprskových metod. Tak např. v okolí některých singularit lze pro výpočet vlnového pole užít lokálních asymptotik. Jako příklad uveďme Airyho asymptotiku v okolí kaustiky. V laterálně nehomogenních prostředích však může být struktura singulárních oblastí značně komplikovaná, singulární oblasti se často překrývají. Aplikace modifikací paprskových metod má tedy pouze omezenou platnost.

V průběhu posledních dvou až tří let však bylo navrženo několik obecnějších metod, které potíže paprskové teorie v zásadě odstraňují. Všechny mají jeden společný rys: za základní kostru pro výpočet seismického vlnového pole berou vždy pole paprsků P či S vln. Vlnové pole samotné (amplitudy, syntetické seismogramy) se počítá přesněji.

Ve spolupráci se sovětskými matematiky z *Leningradského oddělení Matematického ústavu A V SSSR* byla v Československu navržena a rozpracována metoda výpočtu seismických vlnových polí v laterálně nehomogenních prostředích, založená na tzv. gaussovských svazcích [10–13]. O této metodě se zmíníme podrobněji v následující kapitole.

6. Metoda gaussovských svazků a gaussovských vlnových klubek

Gaussovské svazky představují řešení elastodynamické rovnice koncentrované v okolí paprsků podélných či příčných vln. Amplitudy těchto řešení exponenciálně ubývají s kvadrátem vzdálenosti od paprsku, přičemž maximálních hodnot vždy dosahují přímo na centrálním paprsku. V ortogonálním souřadném systému vázaném na paprsek jsou gaussovské svazky řízeny parabolickou

rovnici, která formálně odpovídá Schrödingerově rovnici s časově proměnným potenciálem. Šířka a křivost vlnoplochy gaussovských svazků se podél paprsku mění v důsledku difúze, rozšiřování vlnové fronty a odrazů či lomů na rozhraních. Gaussovské svazky nemají singularity, jaké mají řešení paprsková. Jsou regulární i na kaustikách, vlnové pole spojené s gaussovským svazkem proniká i do zón stínu, za překážky apod.

Gaussovský svazek koncentrovaný na nějaký paprsek je fyzikální realitou a může být generován směřovaným zdrojem. Realizace gaussovských svazků je dobře známá z optiky, z radiofyziky apod. V syntetické seismologii však není naším cílem studovat individuální gaussovské svazky, ale počítat kompletní vlnové pole (buzené nesměrovými zdroji, jako např. bodovým zdrojem s regulární vyzářovací charakteristikou) integrální superpozicí gaussovských svazků. Rozklad na gaussovské svazky nám umožňuje vlnové pole diskretizovat.

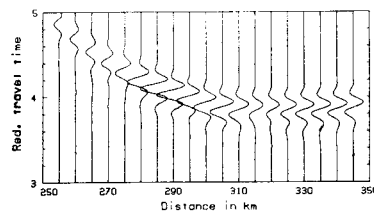
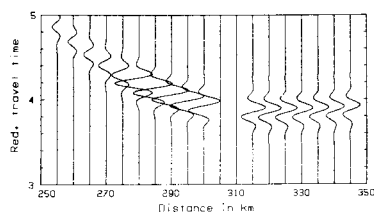
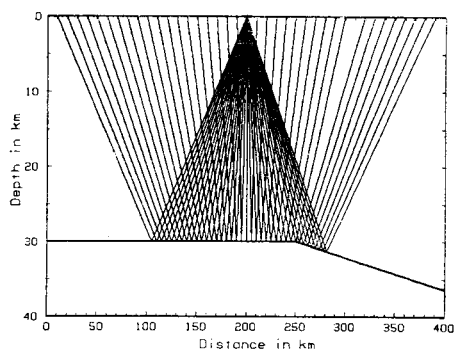
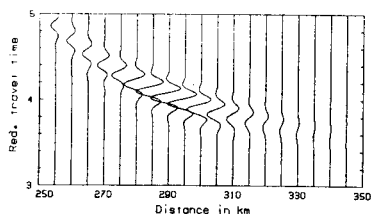
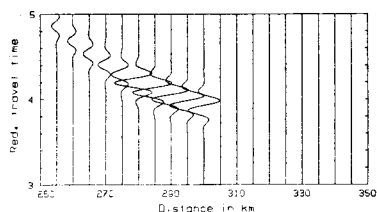
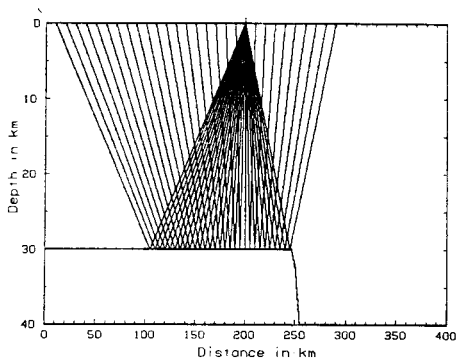
Fyzikálně je postup výpočtu harmonického vlnového pole buzeného řekněme bodovým zdrojem následující: vlnové pole rozložíme v okolí zdroje na diskrétní systém gaussovských svazků koncentrovaných na dvouparametrický systém paprsků vycházejících v různých směrech ze zdroje. Každý svazek je počítán podél příslušného paprsku řešením parabolické rovnice. Konečné vlnové pole v libovolném bodě prostředí se získá superpozicí jednotlivých svazků procházejících okolo tohoto bodu. Ty gaussovské svazky, které leží ve větších vzdálenostech od přijímače, se již uvažovat nemusí, jejich příspěvek je malý. Velkou výhodou je, že není zapotřebí vyhledávat paprsky, které procházejí přesně bodem přijímače. Není tedy nutné provádět časově náročný dvoubodový výpočet paprsků, stačí výpočet s počátečními podmínkami. Gaussovské svazky nejsou zdaleka tak citlivé k detailům aproximace prostředí jako metody paprskové. Ukazuje se tedy, že metoda gaussovských svazků odstraňuje všechny tři problémy paprskových metod zmíněné výše.

V časové oblasti je pak možno přejít od gaussovských svazků k vlnovým klubkům, která jsou plně vázána na paprsky a šíří se podél nich. Syntetické seismogramy se získávají diskrétní superpozicí všech klubek, která „proletí“ okolo přijímače. Nenulové výchyly se objeví na seismogramu pouze v těch časech, kdy vlnové klubko letí okolo přijímače. Vlnová klubka jsou efektivně omezena v prostoru i v čase. Časový průběh oscilací ve vlnovém klubku může být různý. Velmi se osvědčil tzv. Gaborův signál (tj. harmonický nosič s gaussovskou obálkou). Vlnové klubko s časovým průběhem oscilací zadaným Gaborovým signálem nazýváme gaussovským vlnovým klubkem. Šíření gaussovských vlnových klubek podél paprsků je možno počítat analyticky; výpočet je velmi rychlý a efektivní, jsou-li známy paprsky. Pro úplnost dodejme, že při rozkladu libovolné časové funkce zdroje na Gaborovy signály je možno použít tzv. Gaborovy integrální transformace, podobně jako při rozkladu časové funkce na harmonické kmity se používá transformace Fourierovy.

Na základě výše popsané metody gaussovských vlnových klubek byly u nás sestaveny programy pro numerické modelování seismických vlnových polí ve velmi obecných dvoudimenzionálních a třídimenzionálních laterálně nehomogenních prostředích se zakřivenými rozhraními, blokovými strukturami, izolovanými tělesy, vyklíňujícími vrstvami apod. Podrobnější popis metodiky i programů (s mnoha příklady výpočtu) je možno nalézt v [14]. Zde uvedeme dva jednoduché příklady, názorně ukazující přednosti metody gaussovských vlnových klubek ve srovnání s metodami paprskovými. V obou příkladech se uvažuje model s jediným odražejícím rozhraním, svými parametry blízký kontinentální zemské kůře (mocnost kůry ≈ 30 km). Zdroj je položen do bodu s x souřadnicí 200 km bezprostředně k povrchu zemskému. Počítané syntetické seismogramy odpovídají podélným vlnám odraženým od Mohorovičičovy diskontinuity (tj. rozhraní mezi zemskou kůrou a svrchním pláštěm). Model i příslušné paprskové diagramy jsou znázorněny v horních částech, syntetické seismogramy počítané metodami paprskovými ve střední části a syntetické seismogramy počítané metodou gaussovských vlnových klubek ve spodní části obrázků.

Všimneme si nyní obrázků podrobněji. Na obr. 2 je uvažována bloková struktura; v Mohorovičičově diskontinuitě existuje v bodě $x = 250$ km zlom. Paprsková metoda dává odražené vlny pouze do epicentrální vzdálenosti 100 km, tj. do $x = 300$ km, dále se vytváří seismický stín. Na syntetických seismogramech počítaných paprskovými metodami je uvedený stín velmi výraz-

ný, vlnové pole je poměrně silné do vzdálenosti 100 km od zdroje a pak náhle zcela vymizí. Na syntetických seismogramech počítaných metodou gaussovských vlnových klubek jsou zřetelné difúzní jevy, do zóny stínu pronikají difragované vlny. Chování v přechodové zóně mezi osvětlenou oblastí a zónou stínu je frekvenčně závislé.



Obr. 2. Syntetické seismogramy podélných vln odražených od jednoduché blokové struktury ukázané v horní části obrázku (kde je též příslušný paprskový diagram). Seismogramy jsou počítány paprskovou metodou (střed) a metodou gaussovských vlnových klubek (dole). Časová osa je redukováná, odpovídající redukční rychlost je 7 km/s. Převládající frekvence časové funkce zdroje — 4 Hz. Metoda gaus-

Obr. 3. Totéž jako na obr. 2, pro jiný model prostředí s hrotem v rozhraní. Metoda gaussovských vlnových klubek odstraňuje fiktivní paprskový stín v bodech $x = 305$ km a 310 km.

sovských vlnových klubek dává nenulové vlnové pole i v oblasti paprskového stínu a hladký přechod z oblasti osvětlené do oblasti stínu.

Cílem numerického příkladu na obr. 3 je ukázat, že metoda gaussovských vlnových klubek je podstatně méně citlivá k některým neregularitám v rychlostním rozložení, hrotům v rozhraních apod., které se často objevují v modelu prostředí v důsledku nevhodných aproximačních metod. Uvažujme opět předchozí model prostředí, Mohorovičičova diskontinuita má však ve vzdálenosti $x = 250$ km hrot. Pro vzdálenosti větší než 250 km hloubka Mohorovičičovy diskontinuity lineárně vzrůstá. V paprskovém poli se v tomto případě vytváří nevelký „fiktivní“ stín, takže do příji-

mačů umístěných v bodech $x = 305$ km a 310 km nepřichází žádný paprsek. Zatímco paprsková metoda dává pro $x = 305$ km a 310 km úplný stín, metoda gaussovských vlnových klubek dává sice v této oblasti jistý pokles amplitud, vlnové pole má však zcela hladký charakter. Závěrem je možno říci, že metoda gaussovských vlnových klubek je daleko méně citlivá k neregularitám v rychlostním rozložení způsobeným použitou aproximační metodou, což je samozřejmě pozitivní rys. Bylo to potvrzeno mnoha dalšími výpočty.

Literatura

- [1] Fuchs K., Müller G.: *Geophys. J. R. astr. Soc.* **23** (1971), 417.
- [2] Červený V., Fuchs K., Müller G., Zahradník J. ve sborníku *Voprosy dinamickéj teorii rasprostranenijsa sejsmičeskich voln*, sv. 20. (Red. Petrašeň G. I.). Nauka, Leningrad 1981, 84.
- [3] Aki K., Richards P. G.: *Quantitative seismology*. Freeman, San Francisco 1980.
- [4] Červený V.: *Čs. čas. fyz. A* **33** (1983), v tisku.
- [5] Zahradník J.: *Studia geoph. et geod.* **26** (1982), 24.
- [6] Schenková Z., Schenk V., Zahradník J.: *Čs. čas. fyz. A* **33** (1984), 496.
- [7] Červený V., Molotkov I. A., Pšenčík I.: *Ray method in seismology*. Univerzita Karlova, Praha 1977.
- [8] Červený V.: *J. Geophys.* **46** (1979), 335.
- [9] Červený V.: *Seismic wave fields in structurally complicated media. Ray and Gaussian beam approaches*. Rijksuniversiteit Utrecht, Vening Meinesz Laboratorium, Utrecht 1981.
- [10] Červený V., Popov M. M., Pšenčík I. ve sborníku *Proceedings of the XVII. General assembly of the European seismological commission, Budapest 1980*. (Red. Bistricsány E.) Akademiai Kiadó, Budapest 1982, 271.
- [11] Červený V., Popov M. M., Pšenčík I.: *Geophys. J. R. astr. Soc.* **70** (1982), 109.
- [12] Červený V.: *Studia geoph. et geod.* **26** (1982), 120.
- [13] Červený V., Pšenčík I.: *Geophys. J. R. astr. Soc.* **72** (1983), 417.
- [14] Červený V.: *Geophys. J. R. astr. Soc.* **73** (1983), 389.
- [15] *Proceedings of the Workshop meeting of the Commission on controlled source seismology of the IASPEI, Zürich 1983*.

Došlo 14. 1. 1983.