

Advanced Seismic Acquisition and Processing (ASAP) — egy EU által finanszírozott nemzetközi kutatási projekt bemutatása¹

SCHOLTZ PÉTER², NYÁRI ZSUZSANNA²

A 2006 nyarán érkezett értesítés szerint sikeres pályázati elbírálásban részesült az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) vezetésével, a Schlumberger Cambridge Research (SCR) és a WesternGeco mint partnerek által létrehozott közös pályázat az Európai Unió 6. keretprogram (FP6) Human Resources and Mobility (HRM) Activity Marie Curie Actions Marie Curie Host Fellowships for the Transfer of Knowledge (ToK) Development Host Scheme keretében. Ez a támogatási forma, melyre részben a hosszú angol cím is utal, alapvetően egy kutatási téma köré szerveződik és preferáltan az európai kutatók (de a világ számos kutatója) számára biztosít lehetőséget arra, hogy egy fogadó intézmény (ELGI) és néhány partner segítségével tudását gyarapíthassa, illetve a kutatási eredményekkel a fogadó intézményt gazdagítsa. A kutatási témában a szeizmikus mérés és feldolgozás területén kívánunk eredményeket elérni (az angol elnevezés a címben). A projekt 3 éves időtartamú, melynek során mintegy egymillió euró keretösszeg áll rendelkezésre külföldi kutatók magyarországi alkalmazására (maximum 2 év), a partnerek kutatóinak fogadására és a partnerek látogatására ösztöndíjas rendszerben. A keretösszeg a közös kutatási cél dologi költségeire is fedezetet nyújt.

Beszámolónkban összefoglaljuk az előzményeket, bemutatjuk a partnereket, a kutatási témát és felvillantunk néhány részletet az első év eredményeiből.

P. SCHOLTZ, Zs. NYÁRI: Advanced Seismic Acquisition and Processing (ASAP) — introduction of an EU financed international research project

We were notified by a letter received from the EU in the Summer of 2006 that application for a common project was successful within the 6th Framework Programme (FP6) Human Resources and Mobility (HRM) Activity, Marie Curie Actions, Marie Curie Host Fellowships for the Transfer of Knowledge (ToK) Development Host Scheme. The granted project has the Eötvös Loránd Geophysical Institute (ELGI) as the leading (host) institution; Schlumberger Cambridge Research (SCR) and WesternGeco are the industrial partners. This form of support, as the long title partly suggests, is organised around a research topic and provides opportunities for mainly European scientists, but also for researchers from all around the world to enhance their knowledge by the help of a host (ELGI) and its partners. Furthermore it also enriches the host by the results of the research project. The research topic aims to achieve new developments in the field of seismic acquisition and processing (see title). The project lasts for 3 years and we have almost one million euro to cover the cost of employing foreign researchers (maximum 2 years), the visiting scientist of partners (at ELGI) and the outgoing researchers of ELGI (visiting the partners). The budget provides the background for the project costs as well.

In this report we summarise the premises, introduce the partners, the research topic and highlight some research results from the first year of the project.

Előzmények

Egy ekkora nagyságrendű projekt, ilyen partnerekkel, nyilvánvalóan nem jöhetett volna létre az ELGI-ben hosszú évek óta folytatott szeizmikus elméleti és gyakorlati kutatási tevékenység nélkül. A kutatási téma egy részterületével, nevezetesen a vibrátoros szeizmikus forrás vizsgálásával BODOKY et al. [1979], és később BAKI György a vibrátor végelelemes modellezésével már az 1980-as években is foglalkozott. Később GOMBÁR [1991] a vibrátoros mérések jel-zaj viszonyait elemezte. SCHOLTZ [2002; 2003a; 2004] néhány publikációjában, valamint doktori disszertációjában [SCHOLTZ 2003b] a vibrátoros jel meghatározására tett kísérletet. Ezt a kutatási témát az OTKA (T 042552) is támogatta egy hároméves projekt keretében [SCHOLTZ et al. 2006].

A pályázat összefogását, a szerződések kimunkálását, a partnerek koordinálását és az Európai Unió pályázati követelményeinek való megfelelést NYÁRI Zsuzsanna mint a projekt koordinátora biztosítja. Neki sem előzmények nélküli ez a szerepkör, hiszen több hazai és nemzetközi kutatási projekt [pl. NYÁRI 2005] vezetőjeként szerzett már tapasztalatot.

Hasonlóan fontos volt, hogy érdekelt partnereket nyerjünk meg pályázati elképzeléseinknek. Természetesen ez sem lehetett előzmények nélküli, pusztán az elért eredmények, publikációk alapján nehéz fajsúlyos partnert találni. A szükséges pluszt itt egy korábbiól származó személyes kapcsolat jelentette, melyet többéves, a partner cégnél eltöltött munkavégzés alapozott meg. Ezt követte a 2005-ös év során egy kutatási megbízás, melyet az egyik partner részére teljesítettünk, és ez alatt az idő alatt történt a közös pályázat kimunkálása is.

¹ Beérkezett: 2007. október 10-én

² Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet,
H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.



1. ábra. Fehér asztal mellett a közös jövő előkészítése. Balról jobbra: SCHOLTZ Péter kutatásvezető (ELGI); James MARTIN elnökhelyettes (Product Development and Manufacturing, Schlumberger Ltd.); NYÁRI Zsuzsanna projekt koordinátor (ELGI); Ali ÖZBEK tudományos tanácsadó (SCR)

Fig. 1. Preparation of the common future at festive board. From left to right: Péter SCHOLTZ, Scientist in Charge (ELGI); James MARTIN, Vice President (Product Development and Manufacturing, Schlumberger Ltd.); Zsuzsanna NYÁRI, Project Coordinator (ELGI); Ali ÖZBEK, Scientific Adviser (SCR)

A részt vevő intézmények

Fogadó: Eötvös Loránd Geofizikai Intézet

A hazai tudományos közösségnek nem kell bemutatni, de azért álljon itt pár mondat arról, hogy mi mit szerepeltettünk a pályázati anyagban.

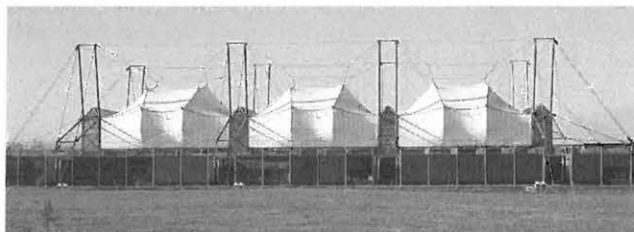
Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) Magyarország egyik legfontosabb kutatóközpontja a geotudományok területén. Tevékenysége felöleli mind az alap- és az alkalmazott geofizikai kutatásokat, mind pedig a geofizikai méréseket. A szeizmikus módszerek alkalmazásával átfogja a sekélyebb mélységű mérnöki problémáktól a mélyebb elhelyezkedésű kéreg és köpeny vizsgálatát is. Az ELGI nemcsak a szeizmikus módszereket, de gravitációs, mágneses, elektromos és elektromágneses, beleértve a tellurikus, magnetotellurikus és radarmérési módszereket is használja a strukturális vizsgálatokban, a geológiai térképezés során, a mérnöki és környezetvédelmi tevékenységben. Az ELGI kezeli Magyarország geofizikai adatbázisait. Laboratóriumokat és obszervatóriumot üzemeltetünk, hogy az ELGI közösségi funkcióit elláthassuk. A paleomágneses, radiometriai, metrológiai és a műszerfejlesztési laboratóriumok megszakítás nélkül, a nemzetközi normáknak megfelelően működnek. A mérési adatokat folyamatosan továbbítjuk más magyar és nemzetközi adatközpontokba. Az ELGI kutatói részt vesznek a hazai egyetemek oktatási tevékenységében előadások és terepgyakorlatok tartásával.

Az „ASAP” Tudás Transzfer (Transfer of Knowledge) projektet a jelenleg is futó módszertani fejlesztési projektek keretein belül folytatjuk, melyek a geofizikai módszerek és műszerek fejlesztését célozzák. Az ELGI fejlesztési tevékenysége a legtöbb geofizikai módszerre kiterjed, így a szeizmikus, gravitációs, geomágneses, képfeldolgozási, karotázs, geoelektromos, elektromágneses, geotermikus és mérnökgeofizikai módszerre is. Módszertani eredményeink és műszerfejlesztésünk nemzetközileg is elismertek.

Ipari partner (1): Schlumberger Cambridge Research

A vezető multinacionális olajipari szolgáltató Schlumberger Ltd. egyik kutatási központja a Schlumberger Cambridge Research Ltd. (SCR). A Schlumberger Ltd. Nyújtja azt a technológiát, projektvezetést és információ techno-

lógiai megoldásokat, amelyek optimalizálják az olaj- és gáziparban tevékenykedő nemzetközi cégek eredményességét. Az olajipari szolgáltatás számára az SCR ad kutatási támogatást a valós idejű értelmezés, geomechanika, fizikai kémia, folyadék mechanika és geofizika területén. Az SCR tudományos munkáját a mögöttes folyamatok megértésére koncentrálja a kísérletezés, a matematikai modellezés és a számítógépes szimulációk eredményeinek ötvöztetésével. A kutatói csapatok több tudományág művelőiből kerülnek ki, úgymint fizika, kémia, anyagtudományok, matematika, statisztika, földtudományok, szilárd és folyadék mechanika, számítástechnika, jelfeldolgozás és műszerek. A Geofizikai részlegen (24 kutató és 3 vezető) belül az egyik csapat a Mérés és Feldolgozás csoport (5 kutató és 1 vezető). Feladatuk a szeizmikus források és a rezervoár monitoring, amihez ez a Tudás Transzfer projekt is tartozik. Az elmúlt években a Geofizikai Osztály mintegy 80 új találmányt szabadalmaztatott. Az SCR 40–50 tudományos közleményt publikál és körülbelül 250 belső jelentés születik évente. Az SCR számos EU finanszírozású projekt aktív résztvevője, a Geofizikai Osztály jelenleg az IMAGES, SPICE és a DEMARAS programoknak is részese. Az SCR kutatói fejlesztik a prototípus terméket, majd tesztelik is. A legújabb fejlesztések azután átkerülnek a Schlumberger cég fejlesztési központjaiba, ahol kidolgozásra kerül a végső verzió, majd alkalmazásba kerülnek.



2. ábra. A Schlumberger Cambridge Research (SCR) építészeti díjas kutatóbázisa

Fig. 2. The main building of Schlumberger Cambridge Research (SCR), which has won prizes on architecture

Ipari partner (2): WesternGeco

A WesternGeco (WG) a legnagyobb szeizmikus kontaktor a világon. Ez a cég működteti az ipar legkiterjedtebb szeizmikus csoportjait és feldolgozási központjait, valamint a legnagyobb több-felhasználós szeizmikus adatrendszer birtokosa. A WesternGeco nagy fejlesztő és feldolgozási központokkal rendelkezik az Egyesült Királyságban és Norvégiában is. A WesternGeco Oslo Technology Centre fejleszti az adatgyűjtő berendezéseket mind a szárazföldi, mind pedig a tengeri és tengerfenéki szeizmikus mérésekhez. Mintegy 36 nemzet szülőtteiből több mint 270 szoftverest, elektromérnököt, gépészmérnököt és geofizikust alkalmaz. A WG vezeti az iparág technológiai átmenetét a nagy csatornaszámú, egyedi érzékelőkkel és egyedi vibrátoros forrással végrehajtott szeizmikus mérések területén, a hagyományos csoportosított vibrátorok és geofonok felhasználása helyett. Az újfajta adatrendszer lehetőséget és kihívást is jelent a minőség javítása és a produktivitás fenntartása szempontjából.

A részt vevő kutatók

A kutatás és tudás átadás szervezésében, irányításában, illetve a kutatás kivitelezésében több ország számos kuta-

tója vesz részt. Intézmények szerinti bontásban az 1. táblázat listázza a neveket rövid feladat meghatározással együtt.

ELGI (fogadó intézmény)	Projekt funkció	Gyakorlat	Státusz
Dr. NYÁRI Zsuzsanna	projekt koordinátor	> 10 év	állandó alkalmazás
Dr. SCHOLTZ Péter	kutatásvezető	> 10 év	állandó alkalmazás
Bibiána KYTKOVÁ	kutató	> 4 év	új alkalmazás
Dr. Giancarla DAL MORO	kutató	> 10 év	új alkalmazás
Dr. Christos SARAGIOTIS	kutató	> 4 év	új alkalmazás
GÚTHY Tibor	kutató	> 10 év	állandó alkalmazás
HEGYMEGI Csaba	kutató	> 4 év	állandó alkalmazás
NEDUCZA Boriszláv	kutató	> 10 év	állandó alkalmazás
Dr. PRÓNAY Zsolt	kutató	> 10 év	állandó alkalmazás
TILDY Péter	kutató	> 4 év	állandó alkalmazás
SCR (partner)			
Dr. Ali ÖZBEK	tanácsadó	> 10 év	állandó alkalmazás
Dr. Ed KRAUGH	programvezető	> 10 év	állandó alkalmazás
Dr. Claudio BAGAINI	kutatási főmunkatárs	> 10 év	állandó alkalmazás
Dr. Pascal EDME	kutató	> 4 év	állandó alkalmazás
Dr. Ying Ji	kutató	> 10 év	állandó alkalmazás
WesternGeco (partner)			
Martin LAYCOCK	projektvezető	> 10 év	állandó alkalmazás
Dr. Kambiz IRANPOUR	fizikus főmunkatárs	> 10 év	állandó alkalmazás

1. táblázat. A kutatási projekt résztvevői

Table 1. Participants of the research project

A kutatási téma

A világ energiaigénye további növekedésének fényében és az átütő sikerű szénmentes technológiák hiányában többféle lehetőség kiaknázására is szükség van ahhoz, hogy a globális klímaváltozás veszélyét elháríthassuk. Minden elérhető fenntartható energiatermelési módszer fejlesztése és hasznosítása alapvető fontosságú. Az olaj- és gázlelőhelyek megkutatása és termelése mellett a klímaváltozást előidéző CO₂ gáz megkötése és geológiai tárolása egyre nagyobb támogatottsággal bíró viszonylag új technológia.

A fejlett szeizmikus mérési és feldolgozási módszerek alkalmazása hatásos eszköz a CO₂ gáz geológiai tárolásának támogatására. A jelenlegi általánosan elterjedt szárazföldi szeizmikus mérési módszer több-vibrátoros jelforrást és csoportosított érzékelőket alkalmaz. A geofonok által észlelt adatokat a vibrátor kimenő jelét kontrolláló elméleti vibrojellel korreláljuk, hogy összenyomjuk, illetve kiemeljük a hasznos szeizmikus jeleket [ANSTEY 1964]. A csoportosítás ahhoz szükséges, hogy a nem kívánt koherens zajt csökkentjük, elnyomjuk a környezeti zajokat és a bemeneti jelet erősítsük. Ez a fajta mérési és előfeldolgozási módszer robusztus és egyszerű, de megvannak hátrányai is. A legfontosabb problémák a jel térbeli és időbeli felbontóképeség csökkenéséből adódnak, mely az egyszerű csoportosítás (forrás, illetve érzékelő) átviteli függvényéből adódik, illetve a csoporton belüli változások sem vehetők figyelembe (észlelési távolság, statikus eltérés, stb.). További gondot okoz az elméleti és nem pedig a valós forrásjel használata az előfeldolgozás során [BLACQUIÈRE, ONGKIEHONG 2000; BAETEN et al. 2001; BAETEN, COMBEE, WEST 2001; SERIFF, KIM 1970; BAETEN, ZIOLKOWSKI 1990].

Ez a kutatási projekt a meglévő módszerek problémáinak megoldását célozza azáltal, hogy

- megbízható jelanalizáló eljárásokat keresünk,
- analizáljuk a vibrátoros jelforrást, annak viselkedését (különös tekintettel a torzításra),
- forrásjel meghatározási és
- jelszétválasztási módszereket fejlesztünk.

A várható eredmények pontosabb eszközöket adnak a tudósok számára a Föld belső szerkezetének tanulmányozásához, valamint hatásos segítséget adnak a kutatóknak újabb nyersanyaglelőhelyek megtalálásához. Ez a tudás nagy előnyt nyújthat mindazon területek számára, ahol a Föld felszínalatti felépítését a szeizmikus reflexiók módszer segítségével kutatják (vibrátoros forrás esetén). Magyarországon (ahol ezek a fejlesztések megvalósulnak) jelenleg a radioaktív hulladék anyagok tárolásához és geotermikus energia potenciál térképezéséhez szükséges a felszínalatti képződmények megismerése. A szénhidrogén kutatások is profitálhatnak ezekből az új eredményekből és megjegyzendő, hogy ez az az iparág, amelynek a CO₂ geológiai tárolásában is nagy szerep juthat.

Tevékenységek, eredmények

A 2006. december 1-től elindult hároméves projekt kivitelezéséhez először meg kellett teremteni a kutatók fogadására alkalmas körülményeket az irodahelyiség kialakításával, a számítógépes és szoftveres háttér megteremtésével. Mivel a Marie Curie Ösztöndíjas rendszer kizárólag külföldi kutatók magyarországi munkavállalását, illetve az ELGI kutatói külföldi ösztöndíjas tartózkodását támogatja, ezért alapvető fontosságú a projekt megfelelő ismertségének

megteremtése az alkalmas kutatók Budapestre csábításához. Ehhez számos hirdetési lehetőséget, konferenciát, személyes kapcsolatot használtunk fel. Eddig 2 kutató 6-6 hónapos és 1 kutató 2 éves alkalmazására került sor. Ez a lehetőség továbbra is nyitva áll, várjuk a kutatók jelentkezését, bár sajnos nem a hazai tudományos közösség számára! Az ELGI kutatói összesen 7 hónapot töltöttek Cambridge-ben és Oslóban, melynek során részt vettek a kutatási program végrehajtásában és különböző új ismeretek megszerzését célzó tanfolyamokon. A partnerek kutatói körülbelül 2 hónapot töltöttek rövidebb időszakokban, hogy ismereteiket megosszák az ELGI-s munkatársakkal a szeizmikus mérés, feldolgozás területén. A kutatási témában több belső jelentés született. Ahhoz, hogy bepillantást nyújtsunk ebbe a szerteágazó tevékenységbe egy részterületen végzett munka eredményeit villantjuk fel egy konferencia előadás nyomán [DAL MORO, SCHOLTZ, IRANPOUR 2007].

Harmonikus zaj csökkentése vibrátoros mérési adatokon

A vibrátor hidraulika és mechanika nemlineáris viselkedése és a vibrátor-talaj csatolás problémái miatt a vibrátoros mérések gyakran harmonikus zajjal terhelték, ami számos esetben jelentős jel/zaj viszony romlást okoz. Ez a nem kívánt jelenség különösen zavaró, amikor a slip-sweep mérési módszert alkalmazzuk a szeizmikus reflexiók mérés produktivitásának növelése érdekében a térbeli mintavételezés javítása mellett [BAGAINI 2006; LEBEDEV, BERESNEV 2004; MEUNIER, BIANCHI 2002; 2005]. Ebben az esetben a később induló vibrálás (slip time = késleltetési idő) felharmonikus komponensei fedésbe kerülnek az azt megelőző vibrálás jeltartományával. A probléma a felharmonikus komponensek amplitúdó- és fázisviszonyainak megismerésével és felhasználásával csökkenthető. Ez az analízis egy frekvenciafüggő amplitúdó- és fáziskarakterisztikát eredményez, amit az alapharmonikus komponenshez képest csak relatív arányaiban határozhatunk meg [SCHOLTZ 2002; 2003a; 2004]. Egyetlen harmonikus komponens relatív amplitúdó függvényének frekvencia szerinti változása viszonylag egyszerű függvénnyel leírható, a fázisfüggés pedig jellemezhető egyetlen konstanssal is (legalábbis a jellemző frekvencia tartományban) és így alapvető viselkedésük néhány paraméterrel visszaadható [DAL MORO 2007]. A felharmonikus–alapharmonikus arány figyelembevételével és egy genetikus algoritmuson alapuló optimalizációs eljárás felhasználásával megkíséreljük a nem kívánt felharmonikus komponenseket csillapítani úgy, hogy az értékes jeleket ne befolyásoljuk.

A Genetikus Algoritmusok (GA) a heurisztikus optimalizációs eljárások családjába tartoznak, és a geofizikai problémák széles körére sikeres megoldást nyújtottak már [NIKRAVESH, AMINZADEH, ZADEH 2003; DAL MORO, PIPAN 2007]. Legnagyobb előnyük, hogy nem érzékenyek a lokális minimumhelyek meglétére, így különösen komplex összefüggések esetén nagyobb eséllyel vethetők be, mint a gradiens alapú módszerek.

A felharmonikus komponensek előremodellezésével, melyet SCHOLTZ [2002; 2003a; 2004] és DAL MORO [2007] analízáló módszerére alapoztunk, egy GA szerint működő eszközt fejlesztettünk arra, hogy a szeizmikus csatornák felharmonikus zaj által maszkolt időtartományának ener-

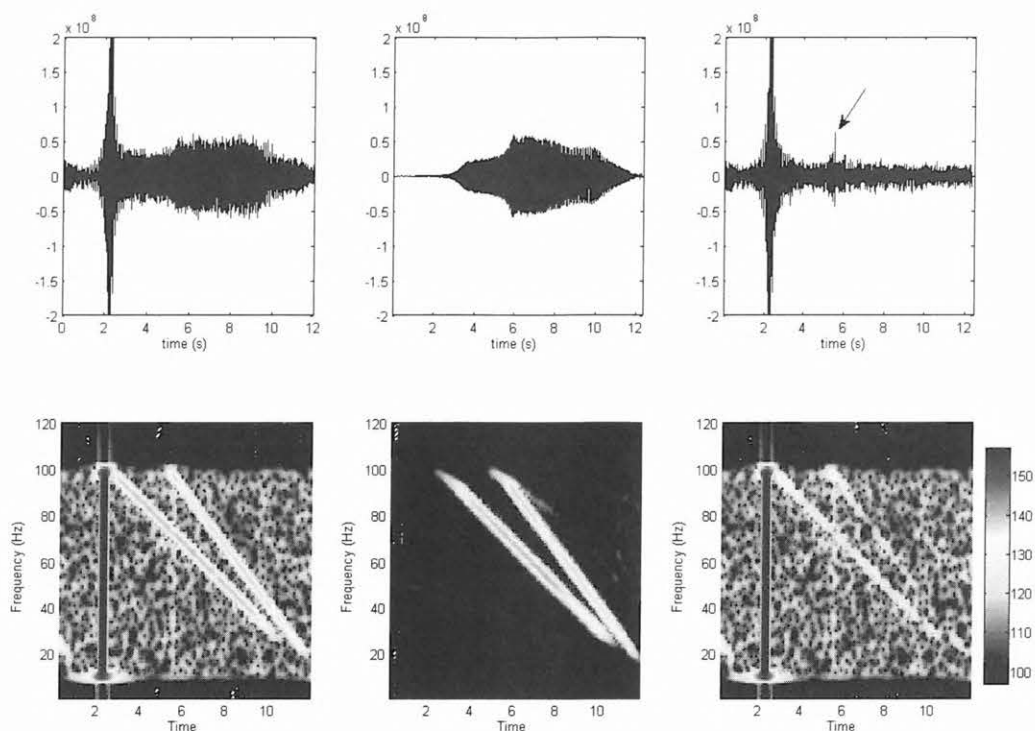
giatartalmát minimalizáljuk. A „költség”-függvényt úgy definiáltuk, hogy az a tényleges szeizmikus csatorna (amely a felharmonikus és az alapharmonikus komponenseket is tartalmazza) és a modellezéssel kiszámolt csatorna (amely csak a felharmonikus komponenseket tartalmazza) különbségéből adódjon. A relatív amplitúdóviszonyokat leíró függvényt diszkrétizáltuk egy elegendő, de limitált számú frekvencia–amplitúdó pont esetén és közöttük lineáris interpolációt alkalmaztunk a szükséges frekvenciatartományban. A legfontosabb bemeneti paraméterek: a számításba vett felharmonikus komponensek száma, keresési tartomány, ahol az optimális megoldást feltételezzük, a populáció mérete, generációk száma és a szeizmikus első beérkezések ideje (a „pozitív” és a „negatív” időtartomány szétválasztásához). A Matlab fejlesztői környezetben létrehozott programrendszert mind szintetikus, mind pedig valódi terepi adatokon teszteltük. A szintetikus adatok 2 felharmonikus komponenset tartalmaznak 15–20%-os relatív amplitúdó aránnyal (az alapharmonikus komponenshez képest). Kezdfázisuk konstans (0,5 és –0,5 rad). Két szeizmikus eseményt generáltunk: egy első beérkezést (az egyszerűség kedvéért konstans, észlelési távolságtól független beérkezési idővel) és egy gyengébb későbbi reflexiós beérkezést. Amplitúdója csupán 1%-a az első beérkezésnek és az egyszerűség kedvéért ez lineáris észlelési távolságtól függő beérkezési időt követ. A szintetikus reflexiók felvételt véletlen zajjal is terheltük a reflexiók amplitúdójával megegyező maximális mértékben. A GA alapú feldolgozás eredményét a 3. ábra mutatja. A véletlen zaj változtatásának függvényében 15–25 dB csillapítást értünk el. Eljárásunk tesztelését az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet valódi terepi adatain is elvégeztük. A 4. ábra az eredeti és a feldolgozott adatok egy csatornáját mutatja. Itt körülbelül 15 dB zajcsillapítást értünk el.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a „Marie Curie Host Fellowships for Transfer of Knowledge (TOK) Development Host Scheme” (szerződésszám: MTKD-CT-2006-042537) keretében elnyert támogatás tette lehetővé.

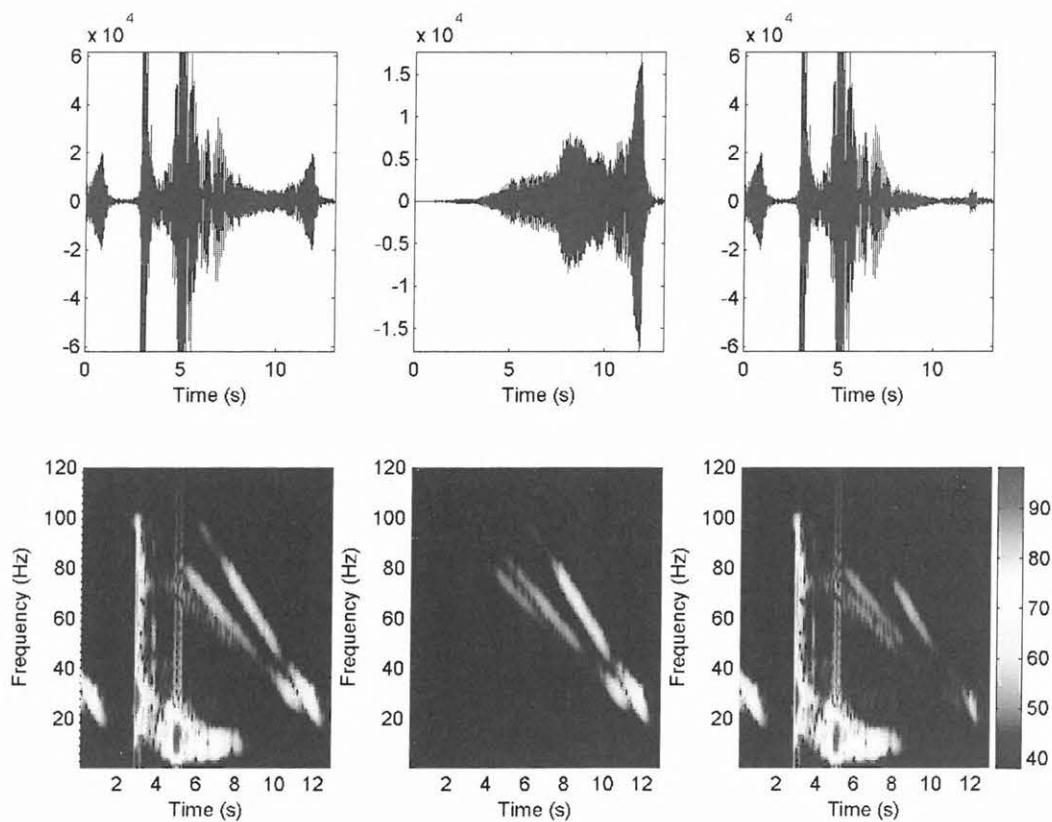
HIVATKOZÁSOK

- ANSTEY N. A. 1964: Correlation techniques — A review. *Geophysical Prospecting* **12**, 355–382
- BAETEN G. J. M., BELOUGNE V., DALY M., JEFFREYS B., MARTIN J. E. 2001: Acquisition and processing of point source measurements in land seismic. 2001 SEG Expanded Abstracts
- BAETEN G. J. M., COMBEE L., WEST L. 2001: Static corrections on single sensor data. 2001 EAGE Expanded Abstracts, IS-1
- BAETEN G., ZIOLKOWSKI A. 1990: *The Vibroseis Source*. Elsevier Science Publishing Co.
- BAGAINI C. 2006: Overview of simultaneous Vibroseis acquisition methods. SEG Technical Program Expanded Abstracts 70–74
- BLACQUIÈRE G., ONGKIEHONG L. 2000: Single sensor recording: anti-alias filtering, perturbations and dynamic range. 2000 SEG Extended Abstracts



3. ábra. Egy felharmonikus zajjal terhelt szintetikus szeizmikus csatorna időképe (fent) és idő-frekvencia képe (lent). Bemenő adat (balra), a meghatározott felharmonikus zaj (középen) és a zajcsökkentés után (jobbra)

Fig. 3. Time series of a synthetic seismic trace with added harmonic noise (above) and its time-frequency representations (below). Input data (left), the estimated harmonic noise (middle) and the trace after noise reduction (right)



4. ábra. Felharmonikus zajt tartalmazó terepi szeizmikus csatorna időképe (fent) és idő-frekvencia képe (lent). Bemenő adat (balra), a meghatározott felharmonikus zaj (középen) és a zajcsökkentés után (jobbra)

Fig. 4. Time series of a seismic field trace containing harmonic noise (above) and its time-frequency representations (below). Input data (left), the estimated harmonic noise (middle) and the trace after noise reduction (right)

- BODOKY T., RUMPLER J., HALMOS P., APOR L. 1979: A vibrátor-talaj rendszer rezonanciajelenségei. *Magyar Geofizika* **XX**, 6, 201–210
- DAL MORO G. 2007: Advanced Seismic Acquisition and Processing (ASAP), EU-funded Transfer of Knowledge (ToK) project. Internal report, Eötvös Loránd Geophysical Institute, Budapest, Hungary
- DAL MORO G., PIPA M. 2007: Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curves and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms. *J. Appl. Geophysics* **61**, 56–81
- DAL MORO G., SCHOLTZ P., RANPOUR K. 2007: Harmonic noise attenuation for vibroseis data. Extended Abstract, GNGTS meeting, Italy
- GOMBÁR L. 1991: A vibrószeiz módszer jel/zaj viszony problémái. Egyetemi doktori dolgozat
- LEBEDEV A. V., BERESNEV I. A. 2004: Nonlinear distortion of signals radiated by vibroseis sources. *Geophysics* **69**, 968–977
- MEUNIER J., BIANCHI T. 2002: Harmonic noise reduction opens the way for array size reduction in vibroseis operations. SEG Technical Program, Expanded Abstracts, 70–73
- MEUNIER J., BIANCHI T. 2005: Cost-Effective, High-Density Vibroseis Acquisition. SEG Technical Program, Expanded Abstracts, 44–48
- NIKRAVESH M., AMINZADEH F., ZADEH L. A. (Editors) 2003: *Soft Computing and Intelligent Data Analysis in Oil Exploration*. Elsevier Science, 754 p.
- NYÁRI Zs. 2005: Roncsolásmentes technológia fejlesztése felszín alatti szennyeződések környezeti diagnosztikájának céljára. GVOP AKF 3.1.1 2004-05-0187/3.0, Munkaszakasz Zárójelentés
- SCHOLTZ P. 2002: Amplitude analysis of harmonics on vibrator generated direct waves. EAGE 64th Conference & Exhibition, Florence, Italy, 27–30 May 2002
- SCHOLTZ P. 2003a: Constructing an output signal estimate of a vibratory source, EAGE 65th Conference & Exhibition, Stavanger, Norway, 2–5 June 2003
- SCHOLTZ P. 2003b: Vibrátorjelek analízise megnövelt felbontóképességű reflexiós szeizmikus mérések adatfeldolgozásához. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem
- SCHOLTZ P. 2004: Validating the basic assumptions in a vibratory source signal estimation method. EAGE 66th Conference & Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2004
- SCHOLTZ P., ÁDÁM O., NYÁRI Zs., GÖMBÖCZ L. 2006: Megnövelt mintavételezésű szeizmikus reflexiós mérések feldolgozása. Kutatási Zárójelentés, OTKA T 042552
- SERIFF A. J., KIM W. H. 1970: The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources. *Geophysics* **35**, 2, 234–246