#### <u>Mikoviny Sámuel</u> <u>Földtudományi Doktori Iskola</u>

A doktori iskola vezetője: Dr. h. c. mult. Dr. Kovács Ferenc egyetemi tanár az MTA rendes tagja

# Vibrátorjelek Analízise Megnövelt Felbontóképességű Reflexiós Szeizmikus Mérések Adatfeldolgozásához

Doktori értekezés

*Scholtz Péter* okleveles bányamérnök

Kutatóhely: Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar Geofizikai Tanszék

**Tudományos vezető:** Dr. habil. Dobróka Mihály a műszaki tudományok doktora tanszékvezető egyetemi tanár

> Miskolc 2003

#### - Ph. D. Thesis -

### VIBRATOR SIGNAL ANALYSIS FOR PROCESSING INCREASED RESOLUTION SEISMIC REFLECTION DATA

Péter Scholtz

#### Abstract

In my dissertation I discuss the analysis of vibratory signals, the possibilities of their estimation, where special attention is given to the higher harmonic content. The output signal of the vibrator can be used to separate source array into point source constituents in order to increase resolution of seismic reflection measurements.

Because of the inaccuracies and/or cumbersome implementation of current techniques my aim was to develop a method which can provide amplitude and phase information of the true source signal even in standard measuring arrangement. Furthermore, my ambition was to provide a novel way to estimate the true ground force of the vibrator, which gives adequate higher harmonic description, too.

A summary was given on the detrimental effects caused by source and receiver arrays in present-day methods and the benefits of point receiver - point source data were listed. I showed the attempts - carried out during the past 40 years - to remove the correlation noise, generated by harmonic distortion.

I discussed the development of non-stationary signal analysis tools, which can be used to study vibrator signals, too. The wavelet transformation gives a general framework to integrate several methods. With the help of synthetic data, I presented time - frequency analysis based on wavelet transformation by Morlet basic wavelet. A special basic wavelet was investigated and compared with the Morlet wavelet, for which only theoretical consideration was given earlier. With the help of the special, linear chirp modulated Gaussian basic wavelet, I got direct information on the chirp rate, the resolution of the analysis became better and the method was less sensitive to noises. I proved the positive behaviour by presenting synthetic examples.

I designed an experimental arrangement, which is only a slightly modified version of the future reflection measurements, where the vibrator generated direct waves, recorded by geophones, are used to analyse the true output of the vibrator. I developed a process, based on wavelet transformation and deterministic deconvolution, which is capable to remove the unknown convolutional effects from the propagating seismic waves and reveals the amplitude and phase relations of the true source signal. Processing the experimental data I established, that the proposed method indeed removed the effects of convolution. I was able to derive the amplitude and phase relations of harmonic distortion generated higher harmonics in the true source signal relative to the fundamental part.

I compared the amplitude and phase functions, based on the geophone recorded direct waves, and the data, representing the source, determined from the accelerometer measurements on the vibrator. The experiment was able to reproduce previous observations: only the even harmonic components of the true output signal, inclusive of the fundamental part, are written down properly by accelerometer data of the vibrator. The odd harmonics, propagated into the earth, are not measured correctly on the vibrator, hence only the new analysis method can provide adequate information on the complete source signal.

It was established, that the relative amplitude and phase data based on the accelerometer measurement on the vibrator, of their own can be sufficient enough to identify the mismatch of odd harmonics between the accelerometer and the geophone data. In case of odd harmonics the relative amplitude and phase functions of the vibrator base plate acceleration, the reaction mass acceleration and the ground force signal are different. In case of even harmonics, the listed functions are similar.

Since the geophone data based processing technique provided only relative amplitude and phase data of harmonics contained in the true source signal, I proposed a novel way to determine the true source signal. Assuming the validity of the fundamental part in the ground force signal, a method, based on correlation and deterministic deconvolution was used to combine the geophone data based relative information with the valid part of the vibrator ground force signal. The resulting new ground force signal better represents the true ground force of the vibrator, especially the higher harmonics, since it is calculated by combination of valid measurements.

On the experimental data, I calculated the ground force estimation by combination. I compared it to the relative amplitude and phase functions of the direct waves recorded by geophones and of the ground force measurement of the vibrator. With the combination technique I got a ground force estimation with better higher harmonic representation, which was proved by the increased correlation coefficient values.

The results presented in the dissertation can enhance the source array signal separation and can help the deterministic deconvolution with true source signal to replace the technique of correlation with theoretical sweep for the benefit of increased resolution vibratory seismic methods.

## Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. A reflexiós szeizmikus mérési módszer	7
1.1 Hagyományos mérési módszer: a csoportosítás hatása	7
1.1.1 Síkfelületű hullámfront	9
1.1.2 Érzékelők, források azonos minősége	10
1.1.3 A talaj és a talajcsatolás azonossága	10
1.1.4 A hullám amplitúdók állandósága	10
1.1.5 A felszínközeli rétegek sebessége és vastagsága állandó	12
1.1.6 A források/érzékelők egyenközűsége	12
1.2 Az HFVS módszer	13
1.3 Kísérleti mérés és jelszétválasztási példa	16
2. A vibrátoros mérési módszer fejlődése	18
2.1 Harmonikus torzítás	18
2.2 Korrelációs zajt csökkentő eljárások	25
2.3 Következtetések	32
3. Szeizmikus beérkezések idő - frekvencia analízise	33
3.1 Analizáló módszerek	33
3.1.1 Elemihullám transzformáció	35
3.1.2 Szintézis formula	37
3.2 A Morlet-féle analizáló elemihullám	37
3.3 Lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú alapfüggvény	38
3.3.1 Előzmények	38
3.3.2 Alapelv	40
3.4 Szintetikus példák	41
3.4.1 Vibrojel	41
3.4.2 Diszperz jel	44
3.5 Következtetések	49

1

4. Valódi vibrátorjel amplitúdó- és fázisviszonyai geofonjelek alapján	50
4.1 Analizáló módszer	50
4.1.1 Harmonikus komponensek elkülönítése	50
4.1.2 Vizsgált hullámtípus	52
4.1.3 Konvolúciós hatások eltüntetése	52
4.2 Terepi adatok analízise	54
4.2.1 Kísérleti mérés	54
4.2.2 Tipikus felvétel	55
4.2.3 Geofon és gyorsulásmérő jelek elemihullám transzformációja	56
4.2.4 Geofonjel harmonikus komponenseinek amplitúdó-viszonyai	61
4.2.5 Geofonjel harmonikus komponenseinek fázisviszonyai	66
4.3 Következtetések	71
5. Vibrátoron és geofonon mért jelek összehasonlítása	72
5.1 A vibrátor gyorsulási adatainak analizáló módszere	72
5.2 Amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlítása	73
5.2.1 Az alap- és az első felharmonikus relatív	73
5.2.2 Az alap- és a második felharmonikus relatív	75
5.2.3 Az alap- és a harmadik felharmonikus relatív	76
5.2.4 Az alap- és a negyedik felharmonikus relatív	77
5.3 Amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlítása korreláció alapján	79
5.4 Következtetések	80
6. Vibrátoron és geofonon mért jelek kombinálása	81
6.1 A vibrátor tényleges jelének kombinációs meghatározási alapelve	81
6.2 A vibrátor tényleges jelének lehetséges felhasználása	82
6.3 A felharmonikus komponensek nagyobb frekvenciái hasznosítása	82
6.4 Módszer a vibrátor tényleges jelének gyakorlati meghatározására	84
6.5 A vibrátor tényleges jelének kombinációs meghatározása terepi	86
6.6 Amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlítása korreláció alapján	91
6.7 Következtetések	92
Összefoglalás	93
Köszönetnyilvánítás	95
Irodalomjegyzék	96

#### Bevezetés

A szeizmikus kutatások általánosan használt módszerei a szelvénymenti (2D) és a térbeli (3D) többszörös fedésű, közös mélységpontos reflexiós mérések. Egyszerre akár több ezer csatornán, csoportosított, vertikális érzékelők jelének digitalizált rögzítése történik. A rezgéskeltést szárazföldön vibrátorral, vagy robbantással végzik. Vibrátoros rezgéskeltés esetén az érzékelőkhöz hasonlóan, a jel-zaj viszony javítása miatt, forrásoldali csoportokat is kialakítanak.

A kutatási gyakorlat mind kifinomultabb méréseket igényel a pontosabb földtani információk megszerzéséhez, amihez a szeizmikus hullámtér teljesebb leképezése által juthatunk. Így kerülnek bevezetésre a háromkomponenses mérések a szárazföldön, vagy a négykomponenses mérések a tengerfenéken. Magas minőségi követelményeket támaszt a 4D szeizmika, mely az olajmezők termelése során történt változások időbeli követését kívánja elérni. A kismértékű petrofizikai paraméterváltozások kimutathatósága megköveteli, hogy a mérések pontosan reprodukálhatóak legyenek és felbontóképességük a jelenlegihez képest javuljon.

A szeizmikus hullámok kellő sűrűségű időbeli mintavételezettsége megoldott, viszont a térbeli mintavételezettség nem tökéletes. Bár a rutinszerűen végzett szeizmikus reflexiós méréseknél az egyidejűleg jelet szolgáltató érzékelők száma sokszorosa a ténylegesen rögzített csatornák számának (egy-egy geofoncsoportban több tíz geofon található), viszont jelüket sorba, illetve párhuzamosan kötve az információ egy része elvész, a felbontóképesség csökken.

A csoportosítás elhagyásával legalább egy nagyságrenddel nagyobb számú csatorna egyidejű rögzítése lehet szükséges. Ennek elérését a jelenlegi technikai szint már elérhetővé teszi (például a WesternGeco által kifejlesztett Q-Land, Q-Marine műszer és feldolgozási módszer család; Baeten et al., 2000). A mérhető csatornák száma a több tízezret célozza, ami már elegendő lehet, kiegészítve speciális előfeldolgozó lépésekkel, hogy kellően sűrűn elhelyezett egyedi geofonok jelét rögzítsük.

A vibrátoros mérések esetén alkalmazott forrásoldali csoportosítást a termelékenység fokozása, az egyidejű nagyobb energia bevitele, a felszíni zavarhullámok és egyéb környezeti zajok szűrése indokolja. A csoportosítás viszont ezen az oldalon sem ideális a felbontóképesség gyengülése miatt.

Pontforrás jelének meghatározására, csoportosított rezgéskeltés mellett, számos módszer jöhet szóba. Ilyenek például a VAD (Vibrator Array Decomposition -Vibrátor Csoport Szétválasztás), az HFVS (High Fidelity Vibratory Seismic - Jó Minőségű Vibrátoros Szeizmika) mérési technikák. A kibocsátott jelek kódolásával és valamilyen becslésével érik el, hogy egy későbbi előfeldolgozó lépésben szétválaszthatóak legyenek az egyes vibrátorok által gerjesztett jelek (Allen et al., 1998).

Attól függően, hogy a szeparációhoz milyen bemeneti jelet használunk, megkülönböztethetünk egyszerű jelszétválasztást, amelyben elméleti jelalakot veszünk figyelembe (VAD eljárás), valamint az HFVS eljárásnak megfelelően egy jobb minőségű jelszétválasztást, amiben a vibrátoron elhelyezett gyorsulásmérők jeléből számított földerő közelítést használjuk. Ez utóbbi azzal az előnnyel is jár, hogy a harmonikus torzítás hatására eddig zajként viselkedő beérkezések is hasznosulhatnak, mivel a vibrátor tényleges kimenő jelét jobban közelítő forrásfüggvényt veszünk figyelembe.

Az egyedi, vagyis pontszerű, források pontszerű érzékelőkön mérhető jeleinek ismerete számos előnyt hordoz. A csoporton belüli perturbációk, mint a statikus, dinamikus időeltérések és csatolási különbségek, kiküszöbölhetők. Utólagos feldolgozási lépésekben jobb hatásfokú zavarhullám szűrő tervezhető, hiszen az egyszerű jelösszegzés nem eredményez optimális szűrőt, a csoportok jele alias hatásoktól nem mentes.

Dolgozatomban vibrátoros forrással és egyedi érzékelőkkel végezhető mérések kérdései közül a csoportosított forrás jelének szétválasztásához is használt forrásjel analízisével, meghatározásának lehetőségeivel foglalkozom, különös tekintettel a felharmonikus tartalomra.

Áttekintem a hagyományos mérésekben használt érzékelő- és forrásoldali csoportosítás problémáit és a csoportosítás elhagyásának előnyeit. Bemutatom a csoportosított források szétválasztására a szakirodalomban javasolt néhány módszer elméleti alapjait. Terepi adatokon illusztrálom az HFVS módszerrel történő forrásjel szétválasztás eredményét, mely összevethető a hagyományos módon elérhető szeizmikus képpel, viszont jobb térbeli és időbeli felbontást eredményez.

A csoportosított forrás jelei szétválasztásának megvalósítási lehetőségeiben lényeges szerepet kapnak a vibrátorok által ténylegesen kibocsátott jelek, illetve meghatározásuk módszerei. Az elfogadott elmélet és gyakorlat alapján a vibrátorok talpán és reaktív tömegén elhelyezett gyorsulásmérők jeleinek, a talp és a reaktív tömeg tömegével súlyozott összege adja a földerőt. A távoli jel, amely geofonnal mérhető és a részecskeelmozdulás sebességét adja, a földerő jel időbeli deriváltjával van fázisban (az időkésést nem számítva) és arányos azzal (Baeten és Ziolkowski, 1990). A vibrátor tényleges jelének az elméleti, megkívánt vibrojelhez való hasonlatosságát a számított földerő jelnek a vibrátor vezérléséhez való visszacsatolásával érik el. A vibrátor szervo-hidraulikus vezérlésében, illetve a talaj - vibrátor rezgőrendszerben lévő nemlineáris hatások, illetve az aszimmetria miatt a tényleges kimenő jel torzított és felharmonikus jelekkel terhelt (Seriff és Kim, 1971). Az elméleti modellezések és analitikus számítások során általában csak lineáris hatásokat vesznek figyelembe (Lerwill, 1981; Baeten és Ziolkowski, 1990), viszont a megfigyeléseket csak a nemlineáris hatásokat is leíró, analitikus eljárás képes visszaadni (Walker, 1995).

A vibrátor által kibocsátott jelek analíziséhez, vagy más, időben változó frekvenciájú jelek (például zavarhullámok diszperzív tulajdonságú beérkezései) vizsgálatához olyan eljárás szükséges, mely képes idő - frekvencia képet előállítani. Dolgozatomban áttekintem a változó frekvenciájú jelek vizsgálatához használt módszerek fejlődését, melvben az elemihullám transzformáció (wavelet transformation) teremti meg több megközelítés egyesített leírását. Szintetikus adatok segítségével bemutatom az elemihullám transzformáció működését az általánosan használt Morlet-féle elemihullámmal (Morlet, 1982). Megvizsgálom a többek által javasolt (Grossmann et al., 1989; Chakraborty és Okaya, 1995), de ki nem próbált speciális elemihullám alkalmazhatóságát, amit Baraniuk és Jones (1993) is csak elméletileg tárgyalt. A speciális elemihullám egy lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jel által modulált Gauss-típusú alapjel. Ha a vizsgálandó jel lokálisan közelíthető lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jellel az általam bemutatott módszer a Morlet-féle elemihullám analízis eredményét azzal bővíti ki, hogy közvetlenül kapunk információt a frekvenciaváltozás sebességére is. Jobb felbontóképességet és kisebb zajérzékenységet várhatunk, amit példákon igazolok.

A vibrátor tényleges földerő jelének kísérleti mérésére a vibrátor talpa alá helyezett speciális érzékelőket alkalmaznak (Baeten és Ziolkowski, 1990; van der Veen et al., 1999). A távoli jellel való összehasonlításukra fúrólyukba telepített érzékelők biztosíthatják a zajszegény körülményeket (Sallas, 1984; Schrodt, 1987). Rutinszerű méréseknél viszont a vibrátor talpán és a reaktív tömegén elhelyezett érzékelők jelét használnák fel a földerő jel közelítésére, ami a megfigyelések szerint nem mindig adja vissza jól a felharmonikus tartalmat (Baeten et al., 2001a).

Kidolgoztam egy, az elemihullám transzformáción alapuló, feldolgozási eljárást, mellyel a szeizmikus jeleket terjedésük és mérésük során érő ismeretlen konvolúciós hatások eltüntethetők és a forrásra jellemző tényleges amplitúdó- és fázisviszonyok tanulmányozhatóvá válnak.

A dolgozatban bemutatok egy, a jövőbeni gyakorlati mérésekhez közelítő kísérleti elrendezést, ahol a felszínen elhelyezett geofonokon észlelhető direkthullám beérkezések nyújtanak segítséget a vibrátor által ténylegesen kibocsátott jel analíziséhez.

A kísérleti mérés adatait vizsgálva ellenőrzöm, hogy az analizáló módszer valóban eltávolítja-e a konvolúciós hatásokat. Meghatározom a vibrátoros forrásra jellemző, annak tényleges kimenőjelében a harmonikus torzítás által létrejött felharmonikus hullámok amplitúdó- és fázisviszonyait az alapharmonikus jelhez képest. A vibrátoron mérhető gyorsulási adatok és a számított földerő jel arányait összevetem a geofonok jeléből számított arányokkal és vizsgálom, hogy a számított földerő jel, vagy a korábban visszacsatolási jelként használt gyorsulási adatok harmonikus komponensei milyen amplitúdó- és fázisviszonyokkal rendelkeznek. A harmonikus komponensek összehasonlítása a számított földerő közelítés jóságáról nyújt információkat.

Mivel a geofonok jeleiből csak relatív amplitúdó- és fázisviszonyokat határoztam meg, így javaslatot teszek olyan módszerre, amellyel kombináció útján nyerhető a földerő jel. A vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból számított földerő alapharmonikus komponensének jóságát elfogadom és egy korrelációt, valamint annak inverzét tartalmazó technikát alkalmazva, elkülönítem. Egy hasonló eljárás után a geofonok jeleiből kapott felharmonikusokat dekonvolválom az alapharmonikus komponenssel. A két adatrendszert kombinálva egy olyan földerő jelet állítok elő, mely felharmonikus tartalmában a tényleges viszonyokat tükrözi, alapharmonikusa pedig, a jó közelítést nyújtó, számított földerőből származik.

A kísérleti mérés adatain elvégzem a földerő jel kombinált meghatározását, és az eredményt összehasonlítom a számított földerő jel, illetve a geofonok jeleiből kapott forrásjel amplitúdó- és fázisviszonyaival.

Az adatok vizsgálatához, feldolgozásához, valamint az ábrák elkészítéséhez a Seismic Unix programrendszer (Cohen és Stockwell, 2000) moduljait és ahhoz illeszkedő saját fejlesztésű programokat használtam.

A dolgozat eredményei hozzájárulhatnak a csoportosított vibrátoros mérések jelei szétválasztásának tökéletesítéséhez, amellyel nagy termelékenység mellett is elérhető a pontforrás és a pontszerű érzékelő jelét alkalmazó reflexiós mérési technika felbontóképességet növelő képessége. A vibrátor tényleges kimenő jelének jobb közelítése dekonvolúciós feldolgozási lépésekben kaphat szerepet, javítva a jel/zaj viszonyt.

#### 1. A reflexiós szeizmikus mérési módszer

A közös mélységpontos reflexiós mérés gyakorlatát kialakító tényezők közül kiemelhető a jel-zaj viszony javítására, a fedésszám növelésére vonatkozó igény, a térbeli (3D) mérések által nyújtott teljesebb szeizmikus képre való törekvés, valamint mindezek mellett a termelékenység mértékének fenntartása és fokozása.

Ezen szempontok figyelembevétele, valamint az egyszerre rögzíthető csatornák véges száma miatt alakították ki a geofoncsoportos észlelés technikáját, amivel a térbeli mintavételezés teljesítését és egyben a zavarhullámok szűrését, ha kompromisszumokkal is, de megoldották.

A szárazföldi jelgerjesztés nem destruktív, jól kontrollált jelalakú és energiájú, termelékeny eszköze a vibrátor. A robbantásos jelgerjesztéshez képest hátránya a nagyobb energiájú zavarhullámkeltő képessége és az egy vibrátor által kibocsátott korlátozottabb energiája. A megoldás itt is a csoportosításban, vagyis több vibrátor egyszerre történő működtetésében rejlik. A jelgerjesztés ismételhetősége által lehetővé tett vertikális összegzés pedig a kellő szintre növeli a kibocsátott energiát.

#### 1.1 Hagyományos mérési módszer: a csoportosítás hatása

Tekintsük azt az egyszerűbb esetet, amikor szelvénymenti mérés során a vonalban egyenközűen elhelyezett geofonok csoportját használják, vagy vonalban elhelyezett vibrátorok működnek egyszerre.

Ádám (1987) nyomán koherens beérkezésekre a következő amplitúdó átviteli karakterisztikát kapjuk:

$$\left| \Phi_n(\frac{k^*}{2}) \right| = \frac{\sin(n\pi \frac{k^*}{2})}{\sin(\pi \frac{k^*}{2})},$$
(1.1)

ahol  $k^*$  a  $k_{Nyquist}$ -re normalizált hullámszámot jelöli ( $k_{Nyquist}=1/(2\Delta x)$ ,  $\Delta x$  a geofonok/vibrátorok távolsága a csoporton belül), *n* a geofonok/vibrátorok száma. Az eredményhez síkfelületű hullámfront és azonos érzékenységű/teljesítményű geofonok/vibrátorok feltételezésével juthatunk.

Az **1.1. ábrán** n=7 tagból álló csoport impulzusra adott válaszának  $f - k^*$  síkbeli amplitúdó képét látjuk.



**1.1. ábra**. Hét elemből álló csoport átvitele az  $f - k^*$  tartományban

Az (1.1) összefüggés és az **1.1. ábra** példája is rávilágít a szűrőfüggvény néhány lényeges problémájára (a megállapítások geofon- és vibrátorcsoportra is igazak):

- alakja nem ideális, hiszen nagy mellékmaximumokkal rendelkezik,
- átvitele alias hatástól nem mentes,
- a mérés során rögzített, a körülményekhez alkalmazkodva nem változtatható,
- a szűrő egy hullámszám szűrő és átvitele frekvenciától független,
- átvitele időben sem változik.

A szűrőfüggvény alakját befolyásolhatjuk, gyengítve a mellékmaximumok mértékét, ha nem azonosak a geofon érzékenységek, vagy a vibrátor energiák. A súlyozás alkalmazása viszont csökkenti a csoport teljes érzékenységét és változtathatósága nehézkes. Használata nem terjedt el, csak különleges esetekben alkalmazzák. A többi probléma csak minden geofon/vibrátor jelének külön-külön való ismerete esetén orvosolható, illetve az alias hatás csökkentése a megfelelő sűrűségű térbeli mintavételezéssel optimalizálható.

Sajnos a gyakorlat során az (1.1) összefüggés levezetéséhez használt feltételezések sem teljesülnek maradéktalanul és így egyéb paraméterek is befolyásolják az eredményt. Az egyszerűsítő feltételezéseket az 1.1.1-1.1.6 alpontok címeiben adom meg és következményeit azokban tekintem át.

#### 1.1.1 Síkfelületű hullámfront

Az egyik fontos beérkezés szempontjából, nevezetesen a forrás irányából a vonal mentén terjedő zavarhullámokra a síkfelületű hullámfront feltételezése nem jelent korlátozást. Oldalbeérkezéseikre (reflektált zavarhullámok) már csak közelítéssel érvényes, hiszen pontszerű forrásból indultak. Ennél a hullámtípusnál nem csak ez okozza a gondot, hanem az is, hogy látszólagos sebessége nagyobb lesz (a legrosszabb esetben végtelenhez tart). Csillapításukra területi csoportok használatosak, ahol a terjedés irányában is lesz megfelelő térbeli mintavételezés.

A vizsgált rétegsor határfelületeiről kapott reflexiók esetén sem síkfelületűek a hullámfrontok, különösen nem sekély mélységű reflexióknál. További probléma, hogy nem végtelen a látszólagos sebességük, sőt a reflexió mélységétől, sebességtől és az észlelési távolságtól függően  $f - k^*$  képe akár átfedésbe is kerülhet a kiszűrni kívánt zavarhullámok f- $k^*$  képével.

Az 1.2. ábrán egy vízszintes, sekély mélységű felület reflexiós hiperbolájának  $f - k^*$  képét látjuk (balra). A jobb oldalon a reflexiós képre gyakorolt szűrőhatást illusztrálom egy n=13 tagból álló csoport esetén. Nyilvánvaló, hogy a tervezés során kompromisszumot kell kötni a zavarhullámok csillapításának érdekében, melyet a sekély mélységből jövő reflexiók gyengítése árán érhetünk el.



# **1.2. ábra.** Reflexiós hiperbola $f - k^*$ képe (balra) és a reflexiós hiperbola $f - k^*$ képe egy n=13 tagból álló csoport szűrőhatása után (jobbra)

#### 1.1.2 Érzékelők, források azonos minősége

Az érzékelők gyártói nagy gondot fordítanak az érzékelők minőségére, így az érzékenységük hasonlóságára is. A geofon érzékenységi állandóságára általában jobb mint +/- 5 % értéket adnak meg. Fázishűségükről nincs adat, csak a harmonikus torzítást közlik, ami jobb mint 0,2 %. A vibrátorok által gerjesztett jelek azonos erőssége is fontos tényező a csoporton belüli szűrőhatás minősége szempontjából. A gerjesztés megkívánt erősségét és fázisát a vibrátor visszacsatolási elven működő rendszere biztosítja. A fázistolás mértéke általában +/- 5 fok, de a vibrálás kezdetén akár 20-30 fok is lehet.

#### 1.1.3 A talaj és a talajcsatolás azonossága

A talajcsatolás mértéke számos dologtól függ. A talaj minősége változhat, a terepi telepítés sem egyenletes (a beszúrás mértéke, az érzékelő függőlegestől való eltérése). A hatások kombinációi már lényegesebb torzításhoz vezethetnek. Az egyegy geofon által mért jel nagyságára gyakorolt hatásukat véletlenszerűnek tekinthetjük, néhány kiugró értékkel. Hasonló megfontolások érvényesek a vibrátor forrásra is. A talaj - vibrátor rezgőrendszer rezonanciája miatt a csoporton belül változó amplitúdójú kimenő jel keletkezhet (Bodoky et al., 1979).

#### 1.1.4 A hullámamplitúdók állandósága

A forrás és érzékelő távolságától függő hullámamplitúdó csökkenés is amplitúdó perturbációt okoz a csoporton belül, mégpedig szisztematikus eltérést. Ez lényeges mértékben a direkthullám, a refrakciós és a zavarhullám beérkezéseket érinti, különösen kis észlelési távolság esetén. A reflexiós hullámok - a csoport hosszán belüli - amplitúdó eltérése kisebb.

Az érzékelt jelek erősségváltozásait okozó csatolási, minőségi és távolságbeli különbségek hatásait vizsgálhatjuk az (1.1) egyenlet általánosabb alakját használva (Ádám, 1987). Ekkor úgy tekintem a csoportot, mintha különböző érzékenységű/teljesítményű tagokból állna. Az érzékenységi különbségeket részben a tényleges gyártási tűrések, a talaj és a geofonok/vibrátorok telepítési minőségének változásai, valamint az észlelési távolság ilyen módon való figyelembevétele okozza. Ekkor az átviteli karakterisztika *n* elemből álló csoport esetén a következő:

$$\Phi_n\left(\frac{k^*}{2}\right) = \sum_{l=1}^n a_l e^{-i2\pi l \frac{k^*}{2}},$$
(1.2)

ahol  $a_l$  az egyes csoporttagok különböző "érzékenységeit",  $k^*$  a  $k_{Nyquist}$ -re normalizált hullámszámot jelöli ( $k_{Nyquist}$ =1/(2 $\Delta x$ ), ahol  $\Delta x$  a geofonok/vibrátorok távolsága a csoporton belül), l a tagok sorszáma, n a darabszáma, az i az imaginárius egység. Mivel  $a_l$  értékei a véletlenszerűségből, illetve a szisztematikus hibából (pl. távolsággal csökkenő amplitúdó) adódóan nem szimmetrikusak a középső elemre, így fázistolás (időtolás) is felléphet.



1.3. ábra. Eltérő érzékenységű tagokból álló csoport szűrőhatása

Az **1.3. ábra** az **1.1. ábra** példájának felel meg azzal a különbséggel, hogy az impulzusra adott válasz kiszámításához a 7 elemből álló csoport egyes elemeinek érzékenységét a következő értékekre állítottam:  $a_l=0.9$ ; 1,1; 1,0; 0,95; 1,0; 1,05; 1,0 (l=1;...;7). Bár az eltérések alig haladják meg egyetlen paraméter tűrési értékét, a szűrőhatás változását, méghozzá negatív irányban, mégis megfigyelhetjük. Ilyen a mellékmaximumok növekedése, illetve a vágás mértékének csökkenése. Ráadásul ez csak egyetlen csoport hatása: a csoportok között is különbség lehet, mind fázisban, mind amplitúdóban, ami tovább rontja a felvétel minőségét.

A probléma bemutatásának egy másik megközelítésére is találhatunk példát (Blacquiére és Ongkiehong, 2000), ahol a szerzők reflexiót és zavarhullámot tartalmazó szeizmogram amplitúdó-viszonyait alakítják véletlenszerűen. Az f - k tartománybeli kép, a perturbációk következtében, zajos lesz. Ez a perturbációs zaj a csoportosítás után is megmarad, rontva a jel/zaj viszonyt.

#### 1.1.5 A felszínközeli rétegek sebessége és vastagsága állandó

A felszínközeli lazaréteg viszonylag kis hullámterjedési sebességgel jellemezhető, illetve vastagsága és sebessége helyről helyre gyorsan változhat. A statikus időbeli tolást okozó hatások figyelembevételére a csoporton belül nincs mód, így a csoportosítás után az általuk okozott perturbációs zaj már csak a csoportok közötti korrekcióval csökkenthető.

#### 1.1.6 A források/érzékelők egyenközűsége

A terepi munka során, bár mindent megtesznek a geofonok, illetve a vibrátorok előírt távolságának betartására, de ennek ellenére itt is véletlen, vagy szisztematikus eltérésekkel kell számolnunk, ami tovább torzítja a csoportosítás elméleti szűrőhatását.





A felszínközeli rétegek vastagság- és sebességváltozása, valamint az érzékelők/vibrátorok nem pontosan egyenközű telepítése a beérkezések időbeli eltéréseit okozzák. Ezek statikus perturbációkként jelentkeznek, amik a csoport szűrőhatását megváltoztatják. Az **1.4. ábra** illusztrálja egy végtelen látszólagos sebességű beérkezés véletlenszerű, maximum 5 ms-os, statikus perturbációjának hatását (balra). A jobboldali ábrarész a 7 elemből álló csoport szűrőhatását is figyelembe veszi. Világosan követhető a nagyobb frekvenciák erős csillapodása, illetve zaj megjelenése olyan tartományokban, ahol perturbáció nélkül nem lenne. A

csoportosítás hatása csak a perturbációs zajt képes csökkenteni, az elveszett nagyfrekvenciás tartomány, illetve a zajhatás miatt lecsökkent értékes jelek már nem hozhatók vissza. Ezt a kérdést vizsgálja Baeten et al. (2001b) is.

#### 1.2 Az HFVS módszer

A csoportosítás okozta problémák legegyszerűbben a csoportosítás elhagyásával oldhatók meg. Érzékelő oldalon ez "csak" az egyszerre rögzíthető csatornák számának növelését követeli meg. Forrásoldalon viszont termelékenységi okokból sem engedhető meg, hogy egyszerre csak egy vibrátor dolgozzon, így a forráscsoport jeleinek szétválasztását kell megoldani. Ennek megvalósítására jöhetnek szóba, például a VAD (Vibrator Array Decomposition - Vibrátor Csoport Szétválasztás), az HFVS (High Fidelity Vibratory Seismic - Jó Minőségű Vibrátoros Szeizmika) mérési technikák (Allen et al., 1998).

A vibrátorral történő jelgerjesztés módja az, hogy egy nagy tömegű test kerül kapcsolatba a talajjal a vibrátor talpán keresztül. Erőhatást kelt úgy, hogy az elektronika által vezérelt hidraulikus henger egy tömeget (reaktív tömeg) mozgat.

Az ideálishoz közeli jelgerjesztést úgy próbálják elérni, hogy a reaktív tömegen és a vibrátor talpán lévő érzékelők jeleivel visszacsatolást létesítenek a vezérlő elektronikához. Ehhez kezdetben csak a talp gyorsulását vették figyelembe, mert úgy gondolták, hogy az a talaj mozgását megfelelően írja le a csatolás következtében. Ezt kérdőjelezte meg Lerwill (1981) és javasolta a reaktív tömeg gyorsulásával arányos jel használatát, hiszen az van fázisban a talajra ható erővel és így a távoli jellel. Sallas és Weber (1982) rámutatott, hogy Lerwill figyelmen kívül hagyta a talp tömegét. Kimutatták, hogy a tömeg és a talp gyorsulását leíró függvény tömeggel súlyozott összege a talajra ható erő közelítő megfelelője. Bár manapság ezzel a jellel végzik a visszacsatolást, vagyis az elektronikus szabályozást, a vibrátor által kibocsátott jel mégsem felel meg teljesen az elméleti vibrojelnek. Ez a különbség számos okra vezethető vissza.

Baeten és Ziolkowski (1990) figyelembe veszik a talp meghajlását is és bevezetik a "flexural rigidity" jelet, mely a visszacsatoláshoz is felhasználható. Rámutatnak a nemlineáris hatásokra, melyek a kibocsátott jeleket befolyásolják. A hidraulikus vezérlőrendszerben a szelepek nyitása és zárása szakadást idéz elő a folyadék áramlásában, így harmonikus torzítás keletkezik. Hasonló torzítást okoz a talaj nemlineáris átvitele is. Walker (1995) modellezte a nemlineáris hatásokat egy egyszerű képlettel, mely a gyakorlatban is megfigyelhető korrelációs zajokat tesz magyarázhatóvá.

A csoportosított rezgéskeltés jeleinek szétválasztására dolgozatomban részletesebben csak az HFVS mérést ismertetem, mert a módszer, egyszerűsítés után, számos más eljárást is magába foglal. Lényeges feltételezése az, hogy a vibrátor által kibocsátott jel valamilyen lineáris összefüggésben van a vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból és a vibrátor részeinek tömegéből számítható erőhatással.

Az **1.5. ábrán** vibrátor és geofon sematikus elrendezését mutatom a vibrátoron elhelyezett érzékelőkkel.



1.5. ábra. Vibrátor és geofon sematikus elrendezése reflexiós mérés esetén

A feltételezés az, hogy a vibrátor tömegének és talpának gyorsulását leíró  $M_j(\omega)$ jel egy  $T(\omega)$  lineáris, minimum fázisú átviteli karakterisztikájú függvénnyel kapcsolható a vibrátor tényleges erőhatásához, amit  $V_j(\omega)$  jelöl (Allen et. al., 1998). A geofon által mért jel frekvenciatartománybeli képe,  $G_j(\omega)$ , a vibrátor tényleges erőhatásának deriváltjával van összefüggésben (a továbbiakban  $\omega$ -t nem jelölöm):

$$M_{j} = TV_{j}, \tag{1.3}$$

$$G_{i} = i\omega V_{i}E + N_{i}. \tag{1.4}$$

A képletekben *i* az imaginárius egység, *E* a föld impulzusra adott válaszfüggvényének,  $N_j$  pedig a véletlen zajnak a frekvenciatartománybeli képe, a *j* index a vibrálás sorszámát jelöli. Mind *T* és  $V_j$  ismeretlen, viszont  $N_j=0$  esetén

$$G_i / M_i = (i\omega/T)E, \qquad (1.5)$$

$$E = \operatorname{deconv.}[G_i / M_i]. \tag{1.6}$$

Az ismeretlen T függvény és a deriválás hatását minimum fázisú dekonvolúcióval távolítják el (T reciproka és deriváltja is lineáris és minimum fázisú). Ezzel a számítási módszerrel kiküszöbölhetővé vált a hagyományosan alkalmazott elméleti jelalakkal való korreláció és a vibrátor által ténylegesen kibocsátott jelek közelítését vették figyelembe. A módszer alkalmas például a vibrátor torzított jelének hasznosítására is, amennyiben azok a vibrátoron jól mérhetők.

Általános esetben, több vibrátor és geofon jelének együttes rögzítése mellett, mátrix formában írhatók a képletek.

$$\mathbf{M} = T\mathbf{V}, \tag{1.7}$$

$$\mathbf{G} = i\omega \mathbf{V} \mathbf{E},\tag{1.8}$$

$$\mathbf{G/M} = (i\omega/T)\mathbf{E}, \qquad (1.9)$$

$$\mathbf{E} = \operatorname{deconv.}[\mathbf{G}/\mathbf{M}], \tag{1.10}$$

ahol *T* ismeretlen, lineáris, minimum fázisú átviteli karakterisztika, **M** a vibrátorok mozgását leíró gyorsulásmérő jelek tömeggel súlyozott összegének,  $i\omega V$  a vibrátorok erőhatásai deriváltjának frekvenciatartománybeli mátrixa, **G** érzékelő jelek, **E** a meghatározandó rétegsor impulzusra adott válaszfüggvényének frekvenciatartománybeli oszlopvektora.

A feldolgozás során végzett jelszétválasztáshoz a mérés folyamán többféle kódolás alkalmazható. A szeparáció minőségét alapvetően javítja, ha a csoport tagjai kimenő jelként egymásra ortogonális függvényeket alkalmaznak. Két vibrátor esetén alkalmazható a plusz-mínusz módszer, ami a legegyszerűbb fáziskódolás. De használhatunk véletlenszerű, vagy növekvő, vagy csökkenő frekvenciájú vibrojelet is. A szeparálhatóság mértékét, különböző vibrojelek esetén, Martin (1993) vizsgálta lyukbeli érzékelők segítségével.

A VAD méréstechnika abban különbözik az HFVS módszertől, hogy az HFVSnél figyelembe veszik a vibrátor tényleges jelét, a VAD-nél a fáziskódolás mellett továbbra is az elméleti vibrojelekkel dolgoznak. A FUND eljárás (Baeten, 2001a) csak a mérhető erőhatás alapharmonikusát veszi figyelembe. Ezzel azt ismeri el, hogy a vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból nem kapunk megfelelő becslést a távoli jelek felharmonikus tartalmára.

#### 1.3 Kísérleti mérés és jelszétválasztási példa

A kódolt, csoportosított jelgerjesztés elve, azaz az (1.7)-(1.10) képletek szerint kifejlesztettem az összetett jelek szétválasztására alkalmas programot.

Az HFVS módszerrel történő mérések feldolgozásához szükségesek a vibrátorok gyorsulásmérő jelei és a vibrátor számított erőhatása. Ezért a vibrátorokon elhelyezett berendezések minden rezgéskeltésnél rögzítették a talpon és a reaktív tömegen elhelyezett gyorsulásmérők jeleit, a referencia vibrojelet és a számított földerőt, melyet memória kártyán tároltak. A geofonjelek korrelálatlanok. A feldolgozás során egymáshoz kell rendelni a megfelelő forrás- és geofonjeleket. A szeparációs algoritmus legalább annyi vibrálást követel meg, ahány vibrátor van a csoportban.

A pontforrás tesztelését az érzékelő oldalon "összehúzott" geofoncsoportok, mint pontszerű érzékelők támogatták.

Egy forráspozícióban egy hagyományos rezgéskeltést végeztünk, amikor két vibrátor azonos fázisú vibrojelet használt, majd egy ellentétes polaritású rezgéskeltést, valamint 2-2 egyedi rezgéskeltést a hagyományos vibrojellel.

A 200 geofoncsoport, mint pontszerű érzékelő került elhelyezésre, 25 m távolságra egymástól.

Középlövéssel korrelálatlan adatok állnak rendelkezésre, ahol vagy egy, vagy két vibrátor dolgozott egyidejűleg, egymástól 10 m távolságra.

Az alkalmazott 15 másodperc hosszú vibrojel lineáris, 8 Hz-től 100 Hz-ig, 0,3 szekundumos átmeneti tartománnyal a kezdetén és a végén.



**1.6. ábra**. Két-vibrátoros forráscsoport korrelált felvétele (felül) és fáziskódolt kétvibrátoros forráscsoport szeparált csatornái (alul)

Az **1.6. ábra** két felvételt jelenít meg. A felső képen egy hagyományos korrelált változat, ahol két-vibrátoros forráscsoport dolgozott. Az alsó képen egy fáziskódolt forráscsoport felvétel előfeldolgozott, szeparált csatornái látszanak. Megfigyelhető a megduplázott térbeli mintavételezettség hasonló forrásoldali teljesítmény mellett.

Tehát a szeparáció nagyobb mintavételi sűrűséget eredményez hasonló termelékenység mellett, általa jobb zavarhullám mintavételezettség és jobb reflexiós felület leképezés kapható. A csoporton belül jelentkező perturbációk kiküszöbölhetők: statikus hibák, csatolási különbségek, észlelési távolság különbözőség, stb. a feldolgozás során megfelelő lépésekkel figyelembe vehető (Baeten et al., 2001a).

#### 2. A vibrátoros mérési módszer fejlődése

Az HFVS módszer egyik összetevője a vibrátor erőhatásából számítható távoli jel felhasználása a jelszétválasztásra. A szeparáció eredményét alapvetően befolyásolja a kibocsátott jel minősége, illetve annak ismerete. Ha nem is szétválasztásra, de pontosabb korrelációra, vagy dekonvolúcióra használjuk a vibrátoron elhelyezett érzékelők jeleit, tisztában kell lennünk azok érvényességével. Irodalmi utalások vannak arra, hogy a gyakorlatban a számított erőhatás nem mindig jó közelítés a távoli jel leírására, ami különösen igaz a felharmonikus tartalomra (Baeten, 2001a).

A következőkben áttekintem a vibrátoros rezgéskeltési módszer fejlődését, a felmerült problémákat, illetve a megoldásukra kifejlesztett lehetőségeket, különös tekintettel a felharmonikusok okozta gondokra.

Az impulzusszerű rezgéskeltést helyettesítő "VIBROSEIS" eljárás a hatvanas évek elejére vált alkalmazhatóvá. Kezdetben többféle eszközt kipróbáltak, így a centrifugál vibrátort is (Crawford et al, 1960), de a mai gyakorlatban a szervohidraulikus vibrátor terjedt el. A kontrollált jelalak és a környezetét kevésbé károsító hatása széleskörű felhasználhatóságot eredményezett. A forrás jelalakja miatt egy lényeges feldolgozási különbség adódik az impulzusszerű rezgéskeltéshez képest: a bemenő és a mért jelek keresztkorrelációja. A keresztkorreláció már ismert volt a radar technikából, a geofizikai kutatás során alkalmazott korreláció tulajdonságait Anstey (1964) áttekintésében is megismerhették a "VIBROSEIS" eljárást is alkalmazni kívánó geofizikusok.

#### 2.1. Harmonikus torzítás

Seriff és Kim (1970) a vibrátor által keltett jelek harmonikus torzításával foglalkozott. Ha a geofonok által regisztrált jelek éppen az elméleti vibrojellel egyeznének meg, akkor az előfeldolgozás során alkalmazott korreláció autokorrelációs beérkezéseket eredményezne. A gyakorlatban ez sajnos nincs így, hiszen a vibrátor által kibocsátott, illetve a geofonon érzékelhető jeleket számos tényező befolyásolja és torzítja. Az abszorpció okozta szűrőhatás, vagy a műszerek hatása hasonló az impulzusszerű rezgéskeltés során tapasztaltakhoz, viszont a vibrátor által kibocsátott jelek nemlineáris szűrőhatások miatt különböznek az elméleti vibrojeltől. Ennek egyik megjelenési formája a harmonikus torzítás. Nemlineáris szűrőhatásokat okoz például a talaj - vibrátor csatolás rossz minősége és a vibrátor vezérlő mechanizmusa.

A gyakorlatban általában lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú vibrojelet használnak.

$$s_0(t) = \alpha_0 \sin[2\pi (f_0 + Qt)t], \qquad (2.1)$$

$$f_{p}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} [2\pi (f_{0} + Qt)t] = f_{0} + 2Qt, \qquad (2.2)$$

$$Q = \frac{f_p(t) - f_0}{2t} = \frac{f_m - f_0}{2T},$$
(2.3)

ahol  $s_0(t)$  az elméleti vibrojel,  $f_0$  kezdőfrekvencia,  $f_m$  végfrekvencia,  $\alpha_0$  és Q konstansok. Az  $f_p(t)$  pillanatnyi frekvencia, T a vibrojel hossza.

A hirtelen változások elkerülésére a vibrojel elejét és végét egy átmeneti függvénnyel simítják a terepi mérések során.

A kimenő jel torzítása egyszerűsítve úgy írható le, hogy az alapharmonikus (l=0) elméleti jeléhez annak felharmonikusait adjuk hozzá. Így a tényleges jel, ahol *l* a harmonikus komponensek indexeit, *n* a számát jelöli,  $\alpha_l$  és *Q* pedig konstansok:

$$s^{n}(t) = \sum_{l=0}^{n-1} \alpha_{l} \sin[2\pi(l+1)(f_{0}+Qt)t]. \qquad (2.4)$$

Ha  $f_m > (l+1)f_0$ , akkor lesznek olyan pillanatnyi frekvenciák, melyek több harmonikus komponensben azonosak, de különböző időpontban jelentkeznek, így a korreláció eredménye zajjal terhelt lesz.

A jelenség illusztrálására a **2.1. ábrán** ideális, illetve harmonikusan torzított növekvő frekvenciájú tipikus vibrojel részletét mutatom.

A modell elméleti vibrojelében a kezdőfrekvencia 8 Hz, a végfrekvencia pedig 100 Hz. Az átmeneti tartomány 0,5 másodperc hosszú és koszinusz függvénnyel simított. A teljes hossz 10 másodperc. A harmonikusan torzított jelben az alapharmonikus és négy felharmonikus komponens található, az alapharmonikus jellel megegyező amplitúdóval.



2.1. ábra. Ideális (kék) és harmonikusan torzított (piros) vibrojel részlete



2.2. ábra. Ideális (kék) és harmonikusan torzított (piros) vibrojel autokorrelációs függvényének részlete

A 2.2. ábra autokorrelációs részletet mutat mindkét vibrojelre. A harmonikusan torzított jel, a több harmonikus komponens nagyobb energiája és a nagyobb frekvenciák felé szélesebb frekvenciatartalma miatt, nagyobb amplitúdóval, kisebb mellékmaximumokkal, illetve élesebb beérkezéssel jellemezhető elemihullámmal rendelkezik korreláció után. Sajnos ez csak a főmaximum közelében igaz, a

harmonikus torzítás és a korreláció együttes hatása által okozott zajok megváltoztatják ezt a pozitív képet.

A 2.3. és 2.4. ábrán a teljes, növekvő, illetve csökkenő frekvenciájú, harmonikusan torzított vibrojelet és annak idő - frekvencia képét mutatom. A vibrojelek amplitúdó változásait a megjelenítés korlátozott felbontóképessége miatt nem követhetjük a baloldali ábrarészleteken. Az idő - frekvencia tartományban mind az öt harmonikus komponens szétválasztható (az alapharmonikus és a négy felharmonikus). Bár dolgozatomban csak a 3. fejezetben kerül részletes ismertetésre, az idő - frekvencia képet mindenütt az elemihullám transzformációval állítottam elő. Általában csak az amplitúdó kép kerül ábrázolásra.

Az amplitúdó-viszonyok alakulásáról megemlíthető, hogy a harmonikus komponensek azonos amplitúdója ellenére az elemihullám transzformáció különböző amplitúdót rendel egy-egy harmonikus komponens frekvenciáihoz. Mivel az egyes harmonikus komponensek azonos időbeli hosszúságúak, de frekvenciatartalmukban eltérnek, így egy adott frekvencia más-más energiával rendelkezik.



2.3. ábra. Harmonikusan torzított növekvő frekvenciájú vibrojel és idő - frekvencia képe



2.4. ábra. Harmonikusan torzított csökkenő frekvenciájú vibrojel és idő - frekvencia képe

A 2.5. és 2.6. ábra az elméleti vibrojellel korrelált növekvő, illetve csökkenő frekvenciájú, több harmonikus komponensből álló vibrojelet mutat. Látható, hogy a kibővített, negatív időtartományt is feltüntető képeken korrelációs zaj jelenik meg. A növekvő frekvenciájú vibrojel esetén csak a negatív időtartományban, a csökkenő frekvenciájú vibrojel esetén a pozitív időtartományban. Gyakorlati szempontból növekvő frekvenciájú vibrojeleknél ez a fajta zaj nem jelent lényeges problémát, hiszen felvételeinken általában időben csökkenő amplitúdójú beérkezések vannak, így a korábbi nagyobb amplitúdójú jeleket kevésbé zavarják a gyengébb korrelációs zajok. Csökkenő frekvenciájú vibrojel esetén már rosszabb a helyzet: a nagyenergiájú elsőbeérkezések korrelációs zaja tönkreteszi a nagyságrenddel kisebb későbbi beérkezések észlelését. Ahogy azt Seriff és Kim (1970) kimutatták, bizonyos tervezési előrelátással kiküszöbölhetők a problémák, de a gyakorlat szempontjából ezek a lehetőségek, például a vibrojel hosszának növelése, vagy a frekvenciatartomány szűkítése nem mindig használható.



2.5. ábra. Korrelált, növekvő frekvenciájú harmonikusan torzított vibrojel



2.6. ábra. Korrelált, csökkenő frekvenciájú harmonikusan torzított vibrojel

Bár a vibrátor működése szempontjából a nagyobb frekvencián induló csökkenő frekvenciájú vibrojel a kedvezőbb, a gyakorlatban a növekvő frekvenciájú vibrojel alkalmazása terjedt el.

Az a kérdés is felmerül, hogyha a tényleges jel harmonikusan torzított, akkor miért nem a harmonikusan torzított jellel korrelálunk. A választ a **2.7. ábra** szemlélteti.

Bár a korrelációs maximum jelentősen megnő, de függetlenül a vibrojel frekvenciaváltozási irányától, korrelációs zaj jelenik meg mind negatív, mind pozitív időtartományban, méghozzá közelebb a csúcshoz, mint a **2.5.** és **2.6. ábrákon**.

A szerzők gyakorlati példákat is bemutatnak, ahol a vibrátor talpán elhelyezett gyorsulásmérő, valamint lyukban elhelyezett szeizmométer spektrumát vizsgálják. A harmonikus komponensek amplitúdó arányait monofrekvenciás rezgéskeltéssel és Fourier analízissel kapják.



**2.7. ábra**. Korrelált csökkenő vagy növekvő frekvenciájú harmonikusan torzított vibrojel, ahol a korreláció a harmonikusan torzított jellel történt

#### 2.2 Korrelációs zajt csökkentő eljárások

Korrelációs zajnak tekintjük a felharmonikusok és az elméleti vibrojel korrelációja következtében létrejött hullámcsomagokat, de korrelációs zajt jelentenek a korrelációs függvény főmaximuma környezetében lévő mellékmaximumok is. Ezeknek a hatásoknak a megismerésére, illetve csökkentésére számos módszer született.

Edelmann (1966) néhány zajhatás kiszűrésére tett javaslatot. A vibrátorok csoportosításával hullámszámszűrést lehet végezni, de a vetők, vagy az erősebben dőlt rétegek jó felbontású leképezéséhez alkalmas, nem túl hosszú csoportok már nem elégségesek például a refrakciós beérkezések csillapítására. A nagyon nagy energiájú elsőbeérkezések (direkthullámok, refrakciós hullámok) a korrelálás után erős mellékmaximumokkal jellemezhető elemihullámot eredményeznek, ami már a későbbi gyenge reflexiókat elnyomhatja. A mellékmaximumok csökkentésére olyan látszólagos sebesség szűrést javasol, amelynél a vibrátorcsoporton belül a vibrátorok, lyukszűrőt eredményező, megfelelően kontrollált vibrojeleket bocsátanak ki.

Sorkin (1974) szabadalmilag védett eljárása olyan, vibrátorcsoporttal végrehajtott, mérést ír le, mely alkalmas a felharmonikusok okozta korrelációs zaj csökkentésére. A harmonikus torzítást a vibrátor - talaj csatolás körülményeiből származtatva megállapítja, hogy a talaj másképpen viselkedik akkor, mikor a vibrátor talpa felfelé, illetve lefelé mozdul. Az aszimmetria felléphet a vibrátor vezérlőrendszerében, illetve a hidraulikai és mechanikai részeiben is.

Ekkor a rezgőrendszer szimmetriája felborul és így a talp, vagy a talaj felszínének sebességét egy hatványsorral írhatjuk le (a gerjesztés =  $A \sin(2\pi ft)$ ):

$$v(t) = a \sin(2\pi f t) + b \sin^{2}(2\pi f t) + c \sin^{3}(2\pi f t) + d \sin^{4}(2\pi f t) + ... = a \sin(2\pi f t) + (b/2)(1 - \cos[2(2\pi f t)]) + c(3/4\sin(2\pi f t)) , \qquad (2.5) -1/4 \sin[3(2\pi f t)]) + (d/4)(3/2 - \cos[2(2\pi f t)] + (1/2)\cos[4(2\pi f t)] + ...$$

ahol a, b, c, d konstansok, f a frekveciát, t az időt jelöli.

Ha a gerjesztés polaritását megfordítjuk, a hatványsor páros tagjai nem változtatják meg polaritásukat, így a két gerjesztés jelét kivonva egymásból minden második felharmonikus kiesik, csak a páratlanok maradnak.

A gyakorlatban ezzel a módszerrel minimum két vibrálás szükséges adott pozícióban, ellentétes polaritással. Az egymást kioltó harmonikus komponensek

természetesen nem tökéletesen tűnnek el, hiszen a megismételt jelgerjesztés nem ad pontosan azonos kimenő jelet, például a talaj tömörödése, vagyis tulajdonságainak megváltozása miatt sem. Ezt a technikát általánosította Rietsch (1981) M számú vibrálás esetére. Ő a kezdőfázist vibrálásonként  $2\pi / M$  résszel tolja el és így az M-ik felharmonikusig lehet megfelelő összegzéssel azokat csillapítani, illetve az M+1-ik megmarad, majd újabb M-1 kioltódik.

A továbbiakban még ismertetek néhány módszert a korrelációs zajok csökkentésére, de érdemes megjegyezni, hogy ezeknek a jeleknek a kiszűrése fontos információk elvesztéséhez is vezet, hiszen viszonylag nagy energiával, illetve frekvenciával rendelkeznek. Hasznosításuk több előnnyel járhat.

Riestch (1977) a vibrátorjelek hasonlóságának vizsgálatára fejlesztett ki módszert. Mivel a vibrátorok egyenként gyenge jeleket adnak, ezért csoportosított, illetve ismételt alkalmazásuk szükséges a megkívánt energiájú jel kibocsátására. Az egyedi vibrátorok vezérlése ekkor még a vibrátor talpa gyorsulásának fázisával visszacsatoltan történt, ezzel biztosítva az elméleti vibrojelhez való hűséget. A mechanizmus helyes működésének ellenőrzésére a mai napig bizonyos időnként ellenőrző méréseket végeznek és a mért jelek hasonlóságát vizsgálják. Rietsch az akkori egyszerű szemrevételezés helyett javasolta az időtolást, illetve fáziskülönbséget kimutatni képes analitikus eljárását, melyet a vibrátor talpán mért jelek harmonikus torzítása kevésbé zavart.

és Bernhardt Peacock (1978), az elemi autokorrelációs függvény mellékmaximumainak gyengítésére, speciálisan kódolt alapfüggvényekből álló vibrojelet állít elő, melyeknek az a tulajdonsága, hogy ideális esetben az autokorrelációs függvényeik összege a maximumon kívül csak zérus elemeket tartalmaz. Ezzel elkerülhetővé válik a simítással elérhető mellékmaximum csökkentés lényeges energiavesztesége. Werner és Krey (1979) a "Combisweep" technikát ismerteti, mely lineáris vibrojelek kombinálásával nemcsak a mellékmaximumok okozta korrelációs zajt csökkentheti, de bizonyos frekvenciák kiemelésével az abszorpció hatásának kompenzálására is alkalmas a forrás oldalán. Cunningham (1979) szintén az autokorrelációs függvény javításán fáradozik és különböző vibrojel simításokat és kódolási technikákat vizsgál. A hagyományos aperiodikus jelgerjesztési séma helyett periodikus jelgerjesztést javasol, amely hasonló eredmény elérését lecsökkent időráfordítással éri el. Az aperiodikus jelző az ő használatában az adott hosszúságú jelgerjesztést és észlelési időtartamot jelöli, aminek végén befejezettnek tekintjük a folyamatot (az utolsó, számunkra érdekes reflexió is beérkezett), majd ismételjük a vibrálást. A periodikus folyamat pedig azt jelenti, hogy a vibrálás hosszát és az észlelési időt azonosra állítjuk és a folyamatot így ismételjük.

A vibrátor vezérlését 1981-ig a talp gyorsulásának fázisához igazították. Lerwill (1981) ezt kérdőjelezte meg akkor, mikor egy egyszerű vibrátormodell analitikus viselkedését hasonlította valódi mérések eredményeihez. Végkövetkeztetése az volt, hogy az addigi jelhez képest a vibrátor reaktív tömegén elhelyezett gyorsulásmérő jelét vegyék alapul. Sallas és Weber (1982) Lerwill cikkére válaszul rámutatott, hogy a vibrátor reaktív tömegének viselkedése mellett figyelembe kell venni a vibrátor talpának tömegét is, így a számított földerőt, vagyis a tömeg és a talp gyorsulásának tömeggel súlyozott összegét kell a visszacsatolási körben felhasználni.

Edelmann és Werner (1982) ismét a "Combisweep" és a kódolt vibrojelek technikájával (Encoded Sweep Technique) foglalkozik. Számos példán keresztül a korrelációs zaj elnyomásában elért eredményeket tárgyalja. Az előbbi az amplitúdó spektrum alakításával éri el célját, az utóbbi a vibrojel alapelemeinek korlátozott hosszával.

Edelmann (1982) a nemlineáris hatásokat, vagyis a vibrátoron mérhető jelek harmonikus torzítását figyeli meg és relatív felharmonikus arányokat is számol, a vibrátor kimeneti teljesítményének függvényében. Növekvő kimenő teljesítménnyel nagyfokú növekedést mutat be a második felharmonikus tartalomban.

Sallas (1984) munkájában a földerő használhatóságát vizsgálja a távoli jel meghatározására. Különböző visszacsatolási elveket hasonlít össze úgy, hogy lyukbeli jelek korrelált elemihullámait vizsgálja. Megállapítja, hogy az empirikus eredmények jó összhangban vannak a korábbi elméleti munkákkal, amik szerint a földerő és a távoli részecske elmozdulása fázisban van egy időkéséstől eltekintve.

Schrodt (1987) a vibrátor - talaj rezgőrendszerrel foglalkozva a kimenő jel amplitúdó- és fázis ellenőrzését, illetve a vibrátor által generált harmonikusan torzított jelek elnyomását analizálta. Megállapította, hogy ezek a problémák főleg szilárdabb talajon jelentősek. A vibrátor rezonanciafrekvenciája közelében jelentkező talp - talaj csatolás megszűnése a kimenő amplitúdó limitálásával oldható meg. Ő is a stabilabb elemihullámot eredményező számított földerőhöz kötött fáziskontrollt találja jobbnak. A Sorkin (1974), illetve Rietsch (1981) által javasolt fázisforgatásos vibrálási módszert alkalmasnak tekinti arra, hogy a harmonikus komponenseket csillapítsuk.

Martin és White (1989) két módszert fejlesztett ki a vibrátorok folyamatos ellenőrzésére. Az egyik hodogramot, a másik időben változó lyukszűrőt alkalmaz. A módszerek lehetővé teszik a vibrátorjel harmonikus torzításának kvalitatív és kvantitatív módon való vizsgálatát. Az eredmények alapján a vibrátor működésének

zavarai könnyen felismerhetők, a jó vibrátor - talaj csatoláshoz a megfelelő csúcserő kiválasztható.

Baeten és Ziolkowski (1990) könyve egy többéves kutatómunka eredményeit foglalta össze, mely a vibrátor működésének megértését célozta. Munkájukban többek között szerepet kap a vibrátor által kibocsátott jel meghatározása. Analitikus vizsgálataik során figyelembe veszik a vibrátor talpának eddig elhanyagolt hajlékonyságát is. Az analitikus modelljük alapján meghatározott jeleket kísérleti mérések eredményével is összevetik, ahol az általuk használt közelítések alapján számított értékek megfelelő egyezést mutatnak a valóságban mérhető jelekkel.

Pritchett (1991) beszámol egy 1984-85-ös mérésről, ahol két közeli vibrátorcsoport szimultán működésével, majd jeleik szeparációjával gyűjtöttek reflexiós adatokat. A szétválasztást az elméleti vibrojellel, mely az adott esetben nemlineáris volt, alkalmazott korreláció után végezték. A cél idő- és költségcsökkentés volt, nem a felbontóképesség javítása. Bár többen megkérdőjelezték a változó előjelű (plusz-mínusz) vibrálási kódolás jelszétválsztási minőségét, ők a referenciaméréshez képest is elfogadhatónak tartották eredményeiket. Mivel a két csoport viszonylag közel dolgozott egymáshoz, a kapott kompozit jel összetevői amplitúdóban nem tértek el lényegesen egymástól, illetve, amennyiben a szeparáció mégsem volt tökéletes, az nem volt zavaró, hiszen egymáshoz igen közeli mélységpontok jelei kerültek áthatásba.

Gombár (1991) doktori disszertációjában a vibroszeiz módszer jel - zaj viszony problémáival foglalkozik. Egyik saját eredményeként a vibrátoros mérések során keletkező koherens hullámok korrelálatlan időtartományban való rekurzív lyukszűrővel történő csillapításának módszerét írja le. Szűrhetők a direkthullámok, azok felharmonikusai, vagy a refraktált hullámok is. Korreláció után, a szűrés hatásaként, az eredeti nagy amplitúdójú koherens beérkezések korrelációs elemihullámainak mellékmaximumai is csökkennek, így a gyengébb beérkezéseket a korrelációs zaj kevésbé rontja.

Okaya et al. (1992) kéreg mélységű kutatás során figyeltek meg olyan, rezonancia által generált másodlagos forrást, mely a harmonikus torzításhoz hasonlóan, a vibrojel eredeti frekvenciaváltozási sebességétől eltérő jelet eredményezett. Eltávolításukra javasolták, hogy a korrelálatlan szeizmogramok csúszóablakos analízise által kapott f - t képen 2D Fourier transzformációt végezzünk, így különítve el a más-más frekvenciaváltozási sebességgel jellemezhető beérkezéseket. Ebben a tartományban csak az eredeti vibrojelet engedjük át, majd többszörös inverz transzformációval visszakaphatjuk a kiindulási csatornákat, de a nem kívánt hatásoktól mentesen.

Martin (1993) kísérleti mérések eredményeit közli, ahol többféle forrásjel szeparációs technikát hasonlít össze úgy, hogy a vibrátoron mérhető gyorsulásadatokat és fúrólyukban elhelyezett érzékelők jeleit veti össze egyedi, különböző módon kódolt vibrálások után. Vizsgálatait a harmonikusan torzított jelekre is kiterjesztette. A növekvő és csökkenő frekvenciájú vibrojelekkel gerjesztett esetben a szeparációt olyan gyengének találta, részben az el nem nyomott felharmonikusok miatt, hogy ezt a kódolási technikát elvetette. A változó fázisú (variphase) kódolás már jelentősen javította a szétválasztás minőségét és a felharmonikus jeleket is csillapította, bár megítélése szerint a gyakorlatban ez sem elegendő. Ennek a módszernek felel meg 2 vibrátor esetén a plusz-mínusz módszer. Végkövetkeztetése negatív, hiszen egyetlen általa vizsgált módszert sem tartott alkalmazhatónak. Fontos megjegyezni, hogy mindenütt az elméleti vibrojellel történt a szeparáció, vagyis az attól való eltérés lényeges eleme lehetett a minőségromlásnak.

Deluchi (1994) rövid megjegyzéseket fűzött Martin munkájához, melyben megkérdőjelezte a vizsgálati módszert és az abból levont következtetéseket. A legfontosabb kétely az egyedi szeizmogramok vizsgálatához fűződött, hiszen a gyakorlatban többszörös fedéssel dolgozunk és az észlelési távolság változása, valamint a különböző irányú beérkezések miatt tovább javul a jelszétválasztás.

Zhukov et al. (1994) a harmonikus torzítás jeleinek felhasználásával plusz információt nyert, mivel nem csak az elméleti jellel, hanem annak felharmonikusaival is elvégezte a korrelációt. Bizonyos időtartományban a részadatok összegezhetők, felbontóképesség és jel/zaj viszony javulást is elérve.

Walker (1995) a vibrátor működése során fellépő nemlineáris hatások vizsgálatával foglalkozott. Az eddig ismertetett modellezések általában csak lineáris összefüggések feltárására adtak lehetőséget. A valóságban is megfigyelhető harmonikus torzítás nyomán keletkező felharmonikus, szubharmonikus jelek, illetve azok felharmonikusai, továbbá a kaotikus viselkedés is kvalitatív módon tárgyalható az általa használt modell segítségével. A torzított jelforma következtében jelentős használható energia vész el. A tényleges kimenő jel dekonvolúciós használatát javasolja.

Li (1995a) előadásában egy olyan gyorsan elvégezhető módszert mutat be, mely a vibrátor által keltett harmonikus torzítás vizsgálatát teszi lehetővé Martin és White (1989) eljárásához hasonlóan. A módszer lényege a PPSF szűrő (Pure Phase Shift Filter: Egyszerű Fázistoló Szűrő), mely egy adott harmonikus komponens fázis spektrumának inverzéből számítható.

Li et al. (1995b) olyan eredményeket közölnek, melyhez dolgozatom témája is kötődik. Céljuk az volt, hogy a vibrátor talpának gyorsulási adataival közelítve a tényleges kimenő jelet, a korrelációt annak segítségével végezzék el és így közel zérófázisú elemihullámot kapjanak. Mivel mindkét adatsor harmonikusan torzított, a **2.7. ábrának** megfelelő eredményre jutnának, ami nem elfogadható. Eljárásukban a PPSF szűrővel eltávolítják az észlelt elsőbeérkezések felharmonikus tartalmát és ugyanezt teszik a mért talpi gyorsulásadatokon is. Ezzel elérik, hogy keresztkorreláció után az elsőbeérkezések erős felharmonikusainak korrelációs zaja ne érvényesüljön, illetve az alapharmonikus tényleges alakját követő jellel közel zérófázisú elemihullámot kapjanak.

Bár a dolgozat témájához nem tartozik szorosan, de szívemhez közelálló a szerző másik munkája (1997b), mely hasonló elven diszperzív, többmódusú Lovetípusú beérkezések szétválasztását mutatja.

Li (1997a) harmonikusan torzított vibroszeiz adatok, a többszörös szűrés elvén (Multiple Filter Technique) előállított, idő - frekvencia tartománybeli amplitúdóviszonyait vizsgálta. Valódi VSP mérés csatornáin a harmonikus komponensek amplitúdó-viszonyait idő- és mélységtől függően ábrázolta.

Li (1997c) determinisztikus dekonvolúciót alkalmaz vibrátoros mérési anyagok feldolgozásához. A vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból származtatott földerő jelet használta a tényleges kimenő jel közelítésére. Ez korrelációval azért nem hasznosítható, mert a harmonikus torzítás következtében erős korrelációs zaj keletkezik. Dekonvolúcióval nemcsak a korrelációs zaj kerülhető el, hanem a felharmonikus komponensek is hasznosulnak az elemihullám előállítása során, valamint a tényleges fázisviszonyok érvényesülnek, támogatva a torzítatlan elemihullám kialakulását. Szintetikus adatokon kívül valódi VSP mérés adatain is bizonyította a módszer alkalmazhatóságát (bár a földerő helyett csak a talpi gyorsulás jelei voltak számára elérhetőek).

Qin és Smythe (1998) erős direkthullám beérkezések esetén, a korrelációs elemihullám mellékmaximumai okozta zajhatás csökkentésére, a direkthullámok korrelálatlan csatornákon történő kiszűrésére közöl módszert. Eljárásukban az adott beérkezés felismerése, majd időbeli menetének megváltoztatása szerepel. A lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú vibrojelből monokromatikus hullámcsomagot állítanak elő, melyet rekurziós lyukszűrővel távolítanak el. Utána helyreállítják az

eredeti jelet, melyből a nem kívánt erős elsőbeérkezést eltávolították. A korreláció már nem eredményez a gyenge jeleket elnyomó mellékmaximumokat.

Allen et al. (1998) az 1. fejezetben ismertetett HFVS eljárást közlik. Megkísérelnek megoldást nyújtani a harmonikus torzítás, a csoporton belüli csatolási, statikus különbségek, a forrás keltette zaj és a produktivitás növelés problémáira.

Wilkinson et al. (1998) az HFVS módszer gyakorlati alkalmazásában szerzett tapasztalatait közlik. A módszer több egyedi forrás egyidejű működése során alkalmazott jelek utólagos szeparálhatóságát teremti meg úgy, hogy közben a tényleges kimenő jelet, a földerővel közelítve, determinisztikus dekonvolúció során hasznosítja. Előadásukban felhívják a figyelmet a megnövekedett adatmennyiség, az adatszervezés és a méréshez szükséges újabb berendezések használata által adódó problémákra.

Van der Veen et al. (1999) a földerő meghatározására használt súlyozott összegzés módszerének pontosságát vizsgálták egy könnyű vibrátor különböző kísérleti elrendezéseiben. Kutatásaikat a vibrátor eltérő talajtípusokon való viselkedésének tanulmányozására is kiterjesztették. Megállapították, hogy az adatok korrekt feldolgozásához (korrelációhoz, vagy még inkább dekonvolúciójához) a forrásjel pontos ismeretére van szükség. Ennek közelítésére a földerőt egy adott frekvenciatartományban, ahol nem lép fel rezonancia, megfelelőnek találták. A radiációs impedancia meghatározása lehetővé teszi a vibrátor viselkedésének előrejelzését. Így például a kemény talajon (beton) nagyobb arányban kelthetők a nagyfrekvenciák, mint lágyabb talajokon (agyag, homok).

Baeten et al. (2001a) pontszerű forrás jelének rögzítési és feldolgozási módszerével foglalkoztak. A pontforrás jelét csoportosított rezgéskeltés mellett használt kódolt vibrojelek szétválasztásával nyerik. Bemutatják a VAD, az HFVS és a FUND eljárást is. Az utóbbiban csak a vibrátor számított földerejének alapharmonikus jelét használják a tényleges kimenő jel közelítésére. Ezzel azt a hibát akarják kiküszöbölni, amit a földerő felharmonikus tartalmának és a tényleges kimenő jelnek megfigyelt különbözősége okoz. A felharmonikus tartalom energiája, így információhordozó képessége elvész, sőt zajként viselkedik.

Brittle et al. (2001) a hagyományos keresztkorrelációs és az alternatív dekonvolúciós technika előnyeit és hátrányait hasonlítja össze. Sajnos a felharmonikus tartalom nem szerepel a kiindulási modellben.

#### 2.3 Következtetések

Az irodalmi közléseket áttekintve észrevehető, hogy a gyakorlatban alkalmazott korrelációs technika mind a mai napig az elméleti vibrojelet használja. A módszer hátrányainak kiküszöbölésére főleg arra történtek kísérletek, hogy a mért jelekben meglévő felharmonikus tartalmat, vagy annak korrelációs zaját szűréssel csökkentsék.

A másik fejlődési irány azt célozza, hogy a tényleges kibocsátott jelet megismerve, közelítve, a teljes energiatartalmat, vagy annak elfogadható hányadát, determinisztikus dekonvolúció során hasznosítsák. A tényleges kimenő jelet, a vibrátoron elhelyezett gyorsulásmérők valamilyen súlyozása alapján számított, földerő jellel közelítik. Analitikus modellek és kísérleti mérések bizonyítják ennek használhatóságát és korlátait. A kísérleti elrendezések általában tartalmaznak a vibrátor talpa alá elhelyezett mérőeszközöket, vagy lyukba lebocsátott szondákat.

Dolgozatom következő fejezeteiben azt mutatom be, hogy alkalmas analizáló eljárással viszonylag egyszerű kísérleti mérés során is adatok nyerhetők, melyekből számíthatók a felharmonikus tartalmat jellemző amplitúdó- és fázisviszonyok. A vibrátoron rögzített gyorsulásmérők jeleiből számított földerő közelítés és a geofonon ténylegesen mérhető jel összehasonlítható. A levont következtetések alapján a földerő jel kombináció útján nyerhető jobb közelítésére teszek javaslatot.

#### 3. Szeizmikus beérkezések idő - frekvencia analízise

Az időben változó pillanatnyi frekvenciájú vibrojelet, illetve a vibrátoron elhelyezett gyorsulásmérőkön és a felszíni terítésben telepített geofonokon mérhető, közelítőleg hasonló tulajdonságokkal bíró jeleket, úgy tudjuk vizsgálni, hogy valamilyen idő - frekvencia analizáló eljárást hívunk segítségül. A dolgozatban az elemihullám transzformáció (wavelet transformation) kerül felhasználásra, mely egy átfogó keretet ad számos elméleti és alkalmazott tudományág korábban kifejlesztett analizáló, illetve szintetizáló módszerének. Példákat lehet sorolni a geofizika számos területéről, a beszédfelismerés, adattömörítés eszközeiről, vagy megemlíthetőek a szonár, radar alkalmazások módszerei is.

#### 3.1 Analizáló módszerek

Maradva a geofizikánál, illetve szűkebben a szeizmikánál, Dziewonski et al. (1969), illetve Landisman et al. (1969) diszperz Rayleigh- és Love-típusú szeizmikus beérkezések csoportsebesség analíziséhez fejlesztettek ki módszereket. Az előbbiek által kidolgozott eljárás, a "csúszóablakos vizsgálat" (moving window analysis). Időtartományban működik és a Fourier transzformációt használja a szeizmogram megfelelően ablakozott részein. Eredményül amplitúdó- és fázisképet kapunk a periódusidő és a csoportsebesség függvényében. A "többszörös szűrési technika" (multiple filter technique), mely keskenysávú sávszűrések sorozatával dolgozik, frekvenciatartományban működik, így a nem is oly sok idővel azelőtt kidolgozott gyors Fourier transzformáció (Cooley és Tukey, 1965) műveletszám redukáló képességét is kihasználta.

Természetesen az, hogy az említett példákban csoportsebesség - frekvencia összefüggést kerestek, ugyanúgy idő - frekvencia analízist jelentett, hiszen a beérkezési időt az észlelési távolság figyelembevételével alakíthatjuk sebességgé.

A módszerek algoritmusa igen egyszerűen végrehajtható. A csúszóablakos diszperzió analízis lépései:

- egy adott csatornán egy időablakot végigléptetünk,
- minden időablakban spektrumanalízist végzünk,
- az ablak helyzete megadja a beérkezés idejét (a geometria alapján sebességet számolhatunk), az amplitúdó csúcs helye az adott ablakban domináns frekvenciát mutatja.
A keskenysávú szűrésen alapuló diszperzió analízis lépései:

- egy adott csatornán különböző frekvenciákon keskenysávú szűrést végzünk,
- Hilbert-transzformáció segítségével burkoló görbét állítunk elő,
- egy adott frekvenciatartományban az amplitúdó maximuma kijelöli a beérkezés idejét, így a geometria ismeretében (forrás - érzékelő távolsága) a sebesség számítható.

Mindkét módszer ugyanannak az analízisnek két megjelenési formája. Látható, hogy a spektrumanalízis az adott ablakban nem feltétlen kell, hogy Fourier analízist jelentsen, hiszen csökkentett felbontást kapunk az időablak hatása miatt. Szóba kerülhet a maximális entrópia analízis is (Takács, 1980), mely jobb felbontást eredményezhet, mivel az ablakon kívüli adatokról csak annyi a feltételezés, hogy statisztikailag állandó folyamat hozza létre.

Az eredeti ablakozási technikának változatai is születtek. Fontos felismerés volt az, hogy a szűrés után kijelölt maximális amplitúdó nem biztos, hogy az adott szűrő középfrekvenciájához tartozik. Ugyanúgy, egy adott időkapuban mért maximális amplitúdó, melyet Fourier analízissel nyerünk, nem feltétlen az adott időkapu közepéhez tartozik. Ezek a megállapítások a "módosított csúszóablakos diszperzióanalízis" módszerhez vezettek (Kodera et al., 1976). A módszer elmélete már nem egyszerű, de a korrigált idő és frekvencia értékek könnyen számíthatók pillanatnyi attribútumok alapján. A pillanatnyi fázis, illetve a pillanatnyi frekvencia interferáló jelekre való érzékenysége miatt nem ad mindig jobb eredményt.

Komplex attribútumok alapján frekvenciakomponensek pillanatnyi csoportsebesség értékeit definiáltam (Scholtz, 1995), melyek hasonlóan zaj, illetve interferencia érzékenyek. Számításuk egyszerű: sávszűrő sorozattal szűrt többcsatornás felvételek beérkezéseinek burkoló görbéit határozzuk meg, majd a csatornák közti lokális sebességet (Scheuer és Oldenburg, 1988) számítjuk. A szeizmikus csatorna pillanatnyi attribútumainak 2D térre való kiterjesztése Barnes (1996) munkájában lelhető fel részletesen.

Az említett módszerek geofizikai fejlesztését és alkalmazását időben jóval megelőzte a Gábor (1946) által adaptált Fourier analízis, mely a "rövid időtartamú Fourier transzformáció" (Short-Time Fourier Transform) elnevezést kapta. A nem stacionárius időjelet tekintsük stacionáriusnak, melyet x(t)-vel jelölök, ha egy időablakon, h(t), keresztül nézzük.

$$STFT(\tau, f) = \int x(t)h^*(t-\tau)e^{-i2\pi f t} dt, \qquad (3.1)$$

mely gyakorlatilag a csúszóablakos eljárás alapképlete is és a Gábor-féle szintézis formulából adódik. A *t* időt, *f* frekvenciát,  $\tau$  időtolást jelöl,  $h(t)^*$  az időablak komplex konjugáltja. Egy másik megközelítés a keskenysávú szűrés módszerét idézi, hiszen a (3.1) képlet egy adott frekvenciával modulált ablakfüggvénnyel, mint egy sávszűrő impulzusra adott válaszfüggvényével való szűrést is kifejezhet.

## 3.1.1 Elemihullám transzformáció

Rioul és Vetterli (1991) alapján az idő és frekvencia felbontóképességet vizsgálom. A h(t) ablakfüggvény (frekvenciatartományban H(f)), mint szűrő sávszélessége, illetve felbontóképessége

$$\Delta f^{2} = \frac{\int f^{2} |H(f)|^{2} df}{\int |H(f)|^{2} df}.$$
(3.2)

Hasonlóan az időbeli felbontóképesség

$$\Delta t^{2} = \frac{\int t^{2} |h(t)|^{2} dt}{\int |h(t)|^{2} dt}.$$
(3.3)

A Heisenberg-féle egyenlőtlenség szerint

$$\Delta t \Delta f \ge \frac{1}{4\pi} \,. \tag{3.4}$$

Problémát okozhat, hogy az ablakfüggvény megválasztásával azonossá tettük és rögzítettük a felbontóképességet az idő - frekvencia síkon. Változtassuk a felbontóképességet a frekvencia függvényében

$$\frac{\Delta f}{f} = \text{konstans}, \qquad (3.5)$$

illetve vonjuk össze egy új függvényben a moduláló függvényt és a h(t) időablakot. Ekkor

$$g(t,a) = h'(\frac{t}{a}), \qquad (3.6)$$

ahol *a* skálázó faktort jelöl és h'(t/a) tartalmazza a moduláló függvényt is.

A (3.1) képlet módosításával az eredmény az elemihullám transzformáció (Wavelet Transform, WT),

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g^*(\frac{t-b}{a}) dt, \qquad (3.7)$$

ahol  $g^*(t)$  egy alkalmasan választott alapfüggvény komplex konjugáltja, *b* a késleltetési, vagy eltolási idő és *a* a skálázó paraméter, x(t) a jel, WT(a,b) pedig a kétdimenziós elemihullám transzformált (Combes et al., 1989). A g(t) függvény abszolút integrálható, négyzetesen integrálható, sávhatárolt és zéró átlagú (Shensa, 1992).

A módszer algoritmusa:

- a jelet skálázott és késleltetett oszcilláló függvények sorozatával szorozzuk,
- integráljuk az időtartományban és normáljuk.

Előnye, hogy minden frekvenciára és késleltetési időre a frekvencia és a beérkezési idő relatív pontossága azonos. Az időbeli felbontóképesség tetszőlegesen jó lehet nagy frekvencián, a frekvenciatartománybeli felbontóképesség pedig tetszőlegesen jó lehet kis frekvencián. Természetesen ez egymás rovására következik be.

Az amplitúdó- és fázisviszonyokat a WT(a,b) komplex függvény alapján számítjuk a következő módon,

$$A[WT(a,b)] = \sqrt{\operatorname{Re} \{WT(a,b)\}^2 + \operatorname{Im} \{WT(a,b)\}^2}$$
(3.8)

$$\Box[WT(a,b)] = \arctan\frac{\operatorname{Im} \mathscr{W}T(a,b)\}}{\operatorname{Re} \mathscr{W}T(a,b)\}}.$$
(3.9)

## 3.1.2 Szintézis formula

Bár a dolgozatban nem kerül gyakorlati alkalmazásra, de a vibrátorjel harmonikus komponenseinek, illetve a geofonon mérhető alap- és felharmonikus jelek szétválasztása után alkalmazhatnánk az elemihullám transzformáció ellenkező irányú, a dekompozíció megfordítását lehetővé tevő szintézis formulát is. Rioul és Vetterli (1991) alapján az inverz elemihullám transzformáció

$$x(t) = C \iint_{a>0} WT(a,b) \frac{1}{\sqrt{a}} g(\frac{t-b}{a}) \frac{dadb}{a^2}.$$
 (3.10)

A *C* konstans a választott alapfüggvénytől függ. Itt mind a jel és az elemihullám is valós, vagy analitikus komplex.

Bár a folytonos esetben g(t) nem ortogonális, így redundancia lép fel, viszont az eredeti x(t) jel mégis helyreállítható, ha g(t) véges energiájú, sávhatárolt (Shensa, 1992).

### 3.2 A Morlet-féle analizáló elemihullám

A frekvenciával változó felbontóképesség, mely állandó felbontást nyújt a logaritmikus periódusidő skálán, megjelent már Dziewonski et al. (1969) munkájában is. A (3.7) definícióban általánosított megközelítés érvényesül Gauss-típusú ablakfüggvény használata mellett. Mind a frekvencia-, mind pedig az időtartománybeli ablakfüggvény Gauss-típusú marad, hiszen a Fourier transzformáció nem változtatja meg a függvény jellegét. Egy másik fontos tulajdonságra is rámutatnak a Gauss-típusú ablakfüggvény választás igazolására. A idő - frekvencia felbontóképesség bármely más, nem sávhatárolt függvény közül a Gauss-típusú esetén a legjobb. Hasonlóan Gábor (1946) munkájában a Gauss-típusú függvényről kimutatja, hogy a (3.4) Heisenberg-féle egyenlőtlenséget éppen egyenlőség mellett teljesíti.

Az általánosan használt Gauss-típusú alapfüggvényt szokásos Morlet-féle elemihullámnak is nevezni, Morlet et al. (1982) munkássága nyomán,

$$g(t) = e^{-\frac{t^{2}}{2\sigma^{2}}} e^{i2\pi ct} \quad . \tag{3.11}$$

Az *i* imaginárius egység, *c* középfrekvencia és  $\sigma$  az időablak szélességét szabályozza.

A szakirodalomban számos alkalmazásra látunk példát. Leszűkítve a kört a geofizikára és ezen belül a szeizmikára, a legelterjedtebb függvényválasztás a konstans frekvenciájú jellel modulált Gauss-típusú elemihullám. Az eddig említett legjobb idő - frekvencia felbontóképesség mellett általános felhasználhatósága is szerepet játszik, mert nem kell előzetes feltevéssel élni a vizsgálandó jelről.

## 3.3 Lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú alapfüggvény

Az elemihullám transzformáció képlete (3.7) megengedi, hogy bizonyos megkötésekkel, de választható legyen az alapfüggvény. A Morlet-féle elemihullám előnyeit ismertettem, de arra is felhívtam a figyelmet, hogy ha a vizsgálandó adatrendszerünkről a priori ismereteink vannak, akkor azok alapján magához az adatokhoz jobban alkalmazkodó analizáló jelet is kereshetünk.

#### 3.3.1 Előzmények

Grossmann et al. (1989) már bemutattak egy szintetikus példát, ahol egy lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú függvénnyel modulált Gauss-típusú elemihullámot használtak és megjegyezték, hogy egy ilyen választás további vizsgálatot igényel. Baraniuk és Jones (1993) két új ortogonális alapfüggvény családot mutat be, az egyik a "legyező" (fan), másik a "chevron", melyek olyan elemeket tartalmaznak, hogy az idő - frekvencia síkon, az eltoláson és skálázáson kívül, lineárisan változó pillanatnyi frekvenciával is jellemezhetőek. Azt gondolják, hogy ezek az új alapfüggvények bizonyos változó frekvenciájú, illetve diszperz jeleket reprezentálhatnak. Chakraborty és Okaya (1995) szeizmikus adatokhoz alkalmazható elemihullámokat tárgyalt. Ők is megállapítják, hogy a legszélesebb körben a Morletféle elemihullám alkalmazható és még mindig csak javasolják, hogy érdemes lenne az új típusú elemihullámokat is megvizsgálni.

Itt is létezik a másik irányú megközelítés lehetősége. Ilyen az illesztő szűrő (match filter) alapján végzett diszperzió analízis. Capon et al. (1969) a jel/zaj arányának növekedését mutatták ki abban az esetben, mikor illesztő szűrő alkalmazásával diszperzív felszíni hullámokat analizáltak. A szűrőfüggvény lineárisan

változó pillanatnyi frekvenciájú jel volt. Úgy találták, hogy ez az eljárás akkor optimális, ha a csoport beérkezési idő a frekvenciának lineáris függvénye és a felszíni hullámok, valamint a zaj spektruma egyenletes a vizsgált frekvenciatartományban.

Dolgozatomban megvizsgálom az eddig csak javasolt módszert, mely az időfrekvencia analízist egy lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jellel modulált Gauss-típusú alapfüggvény családdal végzi. A módszer alkalmazkodik a diszperz szeizmikus beérkezések, illetve a vibrátorjel speciális tulajdonságaihoz. Ezen a területen megjelent első vizsgálataimat az F 014492 számú OTKA által támogatott kutatási témában végeztem, az elért eredményeket számos alkalommal bemutattam és publikáltam (Scholtz, 1996a; 1996b; 1997a; 1997c; Scholtz és Gili, 1997b; Scholtz, 2001; 2003a). Az elemihullám transzformáció speciális elemihullám mellett való elvégzését az említett munkák alapján tárgyalom.

Amikor Morlet-féle alapfüggvénnyel vizsgálunk szeizmikus jelet, akkor azt feltételezzük, hogy az analizáló ablakban a jel tulajdonságai nem változnak, ami nyilvánvalóan nem igaz sokféle jel esetében. A vibrátorjelek és diszperz jelek sem kivételek ez alól. Lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jellel modulált Gausstípusú elemihullámmal végezve az analízist, diszperz jelek, vagy vibrátorjel esetén, azt feltételezzük, hogy a hullámkomponensek beérkezési ideje lineárisan változik a frekvenciával. Ez diszperz jelek esetén csak szűk frekvenciatartományban elfogadható, viszont vibrátorjelre széles körben igaz lehet. A csoport beérkezési idő frekvenciamenet lineáris közelítését végezte Buchanan és Jackson (1983) is, mikor diszperziós relációt fejtettek Taylor-sorba és a harmadik tagtól csonkították a függvényt. Módszert dolgoztak ki arra, hogy a Taylor-sor harmadik tagjának koefficiensét meghatározzák deriválás nélkül. Ebben a fejezetben összefüggést adok az általuk "lineáris ciripelési mértéknek" (linear chirp rate) nevezett együttható és az általam használt elemihullám frekvenciaváltozási sebességét leíró együttható között.

Az általam kidolgozott módszer az elemihullám transzformációt különböző frekvenciaváltozási sebességgel jellemezhető elemihullámmal végzi. A transzformáció amplitúdó képén minden frekvenciához az amplitúdó csúcsok annál a frekvenciaváltozási sebességnél a legélesebbek, mely megfelel a vizsgálandó jelnek. A beérkezés idejének kijelölése könnyebb zajjal terhelt jelek esetén is. A különböző beérkezési idejű hullámok szétválaszthatósága jobb lesz, illetve a frekvenciaváltozási sebesség meghatározása további segítséget adhat az analízishez. Mindezen előnyök a Morlet-féle elemihullámmal történő transzformációhoz képest jelentkeznek, melyeket szintetikus és terepi példákon is bemutatok.

#### 3.3.2 Alapelv

Az elemihullám transzformáció (3.7) képletében az alapfüggvény megválasztására eddig csak a Morlet-féle elemihullámot mutattam be (3.11). Ha az analizálandó jel lokálisan közelíthető egy lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jellel, ahogy ez igaz lehet vibrátorjelre, illetve diszperz jelek esetén, akkor jobb eredmény várható egy lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jel által modulált Gauss-típusú alapfüggvénytől (Grossmann et al., 1989), ahol

$$g(t) = e^{-\frac{t^{2}}{2\sigma^{2}}} e^{i2\pi(c+\frac{\kappa}{2}t)t}.$$
(3.12)

A középfrekvenciát itt is *c* jelöli,  $\kappa$  a *c*+ $\kappa$ *t* pillanatnyi frekvencia változásának mértéke (frekvenciaváltozási sebesség). Bár az eljárásban  $\kappa$  mint új, ismeretlen paraméter került bevezetésre, viszont ez további információ kinyerésére is felhasználható.

Diszperzív jelek esetén a (3.12) elemihullámmal való összehasonlítás a diszperziós összefüggés másodfokú közelítésének tekinthető. Ez könnyen belátható, ha követjük Buchanan és Jackson (1983) gondolatmenetét. Az  $\omega_0$  körfrekvencia környékén Taylor-sorba fejtett,  $\omega$  (körfrekvencia) függő diszperziós reláció:

$$k(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}k_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots, \qquad (3.13)$$

ahol

$$k_0 = \frac{\omega_0}{V_{phase}(\omega_0)}, \ k_1 = \frac{1}{V_{group}(\omega_0)} \text{ és } k_2 = \frac{\mu(\omega_0)}{V_{group}(\omega_0)}.$$
(3.14)

Mivel

$$V_{group} = \frac{V_{phase}}{1 - \frac{\omega}{V_{phase}}} \frac{\partial V_{phase}}{\partial \omega}$$
(3.15)

és a (3.12) elemihullámban  $\kappa$  az idő - pillanatnyi frekvencia függvény meredeksége, megadhatjuk az összefüggést  $\mu(\omega_0)$  és  $\kappa$  között, ha csonkítjuk a Taylor-sort a harmadik tag után.

$$\mu(\omega_0) = \frac{V_{group}(\omega_0)}{2\pi\kappa D}.$$
(3.16)

A (3.13)-(3.16) képletekben  $\mu$  "lineáris ciripelési mértéket", D a hullám által megtett távolságot,  $V_{group}$  csoportsebességet,  $V_{phase}$  fázissebességet jelöl.

Vibrátorjel esetén egyszerűbb a dolog, hiszen a vibrátorjel általában maga is lineárisan változó pillanatnyi frekvenciával jellemezhető. Következésképpen az elemihullám éppen egy vibrátor jelének is beillik és csak a Gauss-típusú ablakfüggvényben különböznek.

Tehát analizáló módszerem lényege az, hogy az elemihullám transzformációt  $\kappa$  különböző értékeivel megismételve egy 3D eredményteret nyerek. A transzformált térben az amplitúdót (3.8) alapján számolva kijelölhetők az amplitúdó maximumok: megkapjuk egy hullámcsomagra a beérkezési idő (*b* eltolás) és frekvencia (*c/a*) összefüggését, valamint független információként a beérkezés frekvenciaváltozási sebességét ( $\kappa$ ).

## 3.4 Szintetikus példák

Ahhoz, hogy a speciális elemihullám alkalmazásához ismereteket szerezzünk, egyszerű szintetikus adatokon mutatom be a módszer működését.

#### 3.4.1 Vibrojel

A legegyszerűbb példa a vibrátorjel analízise lehet, hiszen maga a jel és az elemihullám szinte teljesen azonos tulajdonságokkal bír. Elméleti vibrojel estén a különbség csupán a jel elejének és végének simításából és az elemihullám Gausstípusú kapuzásából adódik. Természetesen a vibrátoron mérhető gyorsulási adatok, illetve a geofonok jelei az elméleti jel fázis és amplitúdó torzított változatai.

Az ábrázolhatóság és a hatások kiemelése miatt a vibrojel paraméterek közül a jel hosszát a gyakorlati esetekhez képest rövidebbre választottam. Így az alapparaméterek a következők: induló frekvencia 8 Hz, végfrekvencia 100 Hz, hossz 2 másodperc, a lineáris simító függvény a jel elején és végén 0,1 másodperc hosszú, ettől eltekintve a vibrojel egyenletes amplitúdójú.

A **3.1. ábrán** (balra) a vibrátorjel látható, melynek látszólagos amplitúdó változásait, illetve mintázottságát a megjelenítés korlátozott felbontóképessége okozza.



3.1. ábra. Elméleti vibrojel (balra) elemihullám transzformációjának amplitúdó-viszonyai lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú alapfüggvénnyel, a κb metszetben, az 50 Hz-es frekvencián (középen) és az elemihullám sorozat (jobbra), mellyel a középső ábrarész készült

A **3.1. ábrán** (középen) a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jellel modulált Gauss-típusú elemihullám segítségével elvégzett transzformáció amplitúdó-viszonyait ábrázoltam a 3D tér egy metszetében.

Az elemihullám frekvenciaváltozási sebességét ( $\kappa$ ) folyamatosan növeltem egy adott frekvencia esetén (c/a=50 Hz). Az elemihullám transzformáció eredményét  $\kappa$ különböző értékei mellett a 3D tér  $\kappa$  - b (eltolási idő) metszetével ábrázoltam.

Az első csatornán  $\kappa=0$ , ekkor az elemihullám megfelel egy Morlet-típusú elemihullámnak, és növekszik csatornáról csatornára. Az elemihullám transzformáció koefficienseiből számolt amplitúdó értékek legélesebb maximuma egy nullától különböző frekvenciaváltozási mértéknél van ( $\kappa=46$  Hz/s), vagyis a kapott  $\kappa$  értéknél a speciális elemihullám jobban közelíti a vizsgálandó jelet, mint a  $\kappa=0$  esetén. A Gauss-típusú ablak szélességének megválasztása, illetve a jel frekvenciaváltozási paraméterének a mértéke befolyásolja az elérhető eredményt - itt az összehasonlíthatóság kedvéért az ablak szélességét ( $\sigma$ ) azonos mértéken tartottam. A vibrojel frekvenciaváltozási mértékét úgy választottam meg, hogy az eredmények jól demonstrálhatóak legyenek.

A **3.1. ábrán** (jobbra) azt az elmihullám sorozatot ábrázoltam, amivel a középső ábrarészt készítettem. A választott ablakszélesség körülbelül 7 periódusnyi elemihullámot foglal magába. Követhető a Gauss-típusú haranggörbe lecsengése, valamint az, hogy a  $\kappa$  változásával hogyan módosul a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú elemihullám.

Megállapítható, hogy az alkalmazott elemihullámnak megfelelően a beérkezési idő meghatározása pontosabb lehet, illetve független információ kapható  $\kappa$  értéke által, mivel ebből meghatározható a vibrojel idő - frekvencia függvényének egy adott frekvenciaértéknél való meredeksége.

A **3.2. ábrán** összehasonlításképpen bemutatom, hogyan néz ki a teljes vibrátorjel elemihullám transzformációja Morlet-típusú elemihullámmal (középen), illetve a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú alapfüggvénnyel (jobbra).

Az utóbbi esetben a frekvenciaváltozási mértéket a **3.1. ábra** alapján, a középső ábrarész amplitúdó maximuma helyének leolvasásával, illetve a vibrátorjel paramétereinek ismeretében adtam meg ( $\kappa$ =46 Hz/s).

Itt is megállapítható, hogy a vizsgálandó jelhez hasonlító elemihullámmal élesebb kép nyerhető. Az adott szélességű időablakba több energiát sikerült koncentrálni a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú elemihullámmal a Morletféle alapfüggvényhez képest.





# 3.4.2 Diszperz jel

Megállapításaimat egy bonyolultabb példasoron is igazolom, kihasználva azt, hogy diszperz jelek frekvenciakomponensei csoport beérkezési idejének görbéje is tartalmazhat lineáris szakaszokat.

A diszperz jelek elemihullám transzformációját és az adatokhoz illeszkedő elemihullámmal való elvégzésének jellegzetességeit Love-típusú hullámbeérkezés vizsgálatával szemléltetem. Az alkalmazott diszperziós reláció felhasználható mind

bányabeli, mind pedig felszínközeli rétegsorban kialakuló Love-típusú szeizmikus hullámok frekvencia - fázissebesség összefüggésének leírására. Bár a dolgozatban szereplő reflexiós mérések során inkább Rayleigh-típusú hullámbeérkezések detektálhatók, de a többkomponenses mérések elterjedésével a Love-típusú beérkezések is szerephez juthatnak. Az analizáló módszer bemutatására a Love-típusú hullám diszperziós relációja egyszerűsége miatt is alkalmasabb.

A fizikai modell vagy egy szimmetrikus szendvicsszerkezet, ahol egy-egy homogén féltér zár közre párhuzamos határfelületekkel egy kisebb hullámterjedési sebességű réteget (bányabeli eset), vagy egy homogén féltér, felette egy újabb réteg, majd a levegő következik.

A frekvencia - fázissebesség összefüggés mindkétszer azonos, csak a réteg vastagságát jelölő *H* a bányabeli esetben a réteg vastagságának felét, a felszíni esetben a réteg vastagságát jelöli.

Dobróka (1987) alapján a diszperziós reláció:

$$tg(2\pi f 2H\sqrt{\frac{1}{\beta_0^2} - \frac{1}{v_f^2}}) = \frac{\mu_1}{\mu_0} \frac{\sqrt{\frac{1}{v_f^2} - \frac{1}{\beta_1^2}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta_0^2} - \frac{1}{v_f^2}}}.$$
(3.17)

Az *f* frekvenciát,  $v_f$  fázissebességet,  $\beta_0$  a réteg transzverzális hullámterjedési sebességét,  $\beta_1$  a féltér transzverzális hullámterjedési sebességét jelöli,  $\mu_0$  és  $\mu_1$  a réteg és a féltér nyírási modulusai.

A diszperziós reláció alapján szintetikus szeizmogramokat állítottam elő olyan módszerrel, ahogy Baki et al. (1988) diszperz jelek rekompressziójának tanulmányozásához számoltak szintetikus Love-típusú hullámbeérkezéseket.

Az ábrákhoz használt modell paraméterei a valóságban is előforduló rétegvastagság-, sűrűség- és sebességviszonyokat tükröznek, bár vizsgálataim szempontjából nem lényegesek. A frekvencia - amplitúdó összefüggés jelen esetben konstans.

Paraméterértékek: 
$$H = 5 \text{ m}, \frac{\mu_1}{\mu_0} = 1, \beta_0 = 400 \text{ m/s}, \beta_1 = 600 \text{ m/s}.$$

A **3.3. ábra** egy zajmentes Love-típusú diszperzív beérkezést mutat, mely egy 72 m észlelési távolságú csatornán jelenik meg (balra). Középen elemihullám transzformáltjának amplitúdó-viszonyai láthatók a b - c/a (eltolási idő és frekvencia)

síkon úgy, hogy az alapfüggvényben  $\kappa=0$  szerepelt. Ekkor az eredmény egy olyan elemihullám transzformációhoz hasonlít, melyet Morlet-típusú alapfüggvény felhasználásával végzek.

A **3.3. ábra** (jobbra)  $\kappa$  más értékei mellett is mutatja az elemihullám transzformáció eredményét, ahol a 3D tér  $\kappa$  - *b* metszetét ábrázoltam egy kiválasztott frekvencia esetén (*c/a*=12 Hz). Az első csatornán  $\kappa$ =0 és növekszik csatornáról csatornára.

Az elemihullám transzformáció koefficienseiből számolt amplitúdó értékek legélesebb maximuma egy nullától különböző frekvenciaváltozási mértéknél van, vagyis az adott  $\kappa$  értéknél a lineáris frekvenciaváltozási sebességű elemihullám jobban közelíti a vizsgált jelet, mint a  $\kappa$ =0 esetén. A beérkezési idő meghatározása pontosabb lehet, illetve  $\kappa$  értéke által további információ kapható, mivel ebből egy adott frekvenciaértéknél a vizsgált jel idő - frekvencia függvényének meredeksége meghatározható.



**3.3. ábra.** Love-típusú hullám (balra) elemihullám transzformációjának amplitúdóviszonyai  $\kappa$ =0 mellett (középen) és lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú alapfüggvénnyel a  $\kappa$ - *b* metszetben (jobbra)

A **3.4. ábra** véletlen zajjal terhelt Love-típusú diszperzív beérkezést mutat egy 72 m észlelési távolságú csatornán (balra), elemihullám transzformáltjának amplitúdóviszonyai középen láthatók. A zaj mértékét úgy választottam meg, hogy a jel/zaj arány 4-es értékű a jel spektrumában. Az amplitúdókat a *b* - *c/a* (eltolási idő és frekvencia) síkon úgy ábrázoltam, hogy  $\kappa=0$  volt az alapfüggvényben. Ekkor az eredmény itt is olyan elemihullám transzformációnak felel meg, mintha Morlet-típusú alapfüggvényt alkalmaztam volna. A véletlen zaj miatt az amplitúdó menet elmosódottabb, a hullámbeérkezési idők nehezebben jelölhetők.





A 3.4. ábra (jobbra)  $\kappa$  különböző értékei mellett is mutatja az elemihullám transzformáció eredményét úgy, hogy a 3D tér  $\kappa$  - *b* metszetét ábrázoltam egy kiválasztott frekvencia esetén (*c/a*=12 Hz). Az első csatornán  $\kappa$ =0 és növekszik csatornáról csatornára. Az amplitúdó értékek legélesebb maximuma egy nullától különböző frekvenciaváltozási mértéknél van (zöld színű rész), vagyis az ott

leolvasható  $\kappa$  értéknél a speciális elemihullám jobban közelíti a vizsgált jelet, mint  $\kappa$ =0 esetén, következésképp a zajérzékenység kisebb.

Az eljárás szerint egy olyan mintát keresek a szeizmikus csatornán, ami csak a diszperzív beérkezés sajátja, a véletlen zaj nem bír azokkal a tulajdonságokkal. A beérkezési idő meghatározása még a gyakorlatban természetes módon előforduló véletlen zajok mellett is pontosabb lehet.

A lineáris frekvenciaváltozási sebességgel jellemzett elemihullám alkalmazása csak akkor nyújt jobb eredményt, ha az analizálandó jel hozzá hasonló. A vizsgált diszperz jelnél ez csak a menetidő görbe lineáris szakaszára igaz. Példámban ezen a szakaszon jelöltem ki a frekvenciát. A csoport beérkezési idő minimumának közelében, illetve az aszimptotikus szakaszokon az eredmény rosszabb, hiszen ott igen gyors frekvenciaváltozási sebesség lép fel, illetve az iránya is változik. Az amplitúdóviszonyok képén torzulások és erős mellékmaximumok jelentkeznek, amik az analízist megnehezítik.



**3.5. ábra.** Két közeli beérkezési idejű Love-típusú hullám (balra) elemihullám transzformációjának amplitúdó-viszonyai  $\kappa$ =0 mellett (Morlet-féle elemihullámnak felel meg; középen) és lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú alapfüggvénnyel végzett elemihullám transzformáció amplitúdó-viszonyai a  $\kappa$ - *b* metszetben (jobbra)

A 3.5. ábra két szuperponált Love-típusú diszperzív beérkezést mutat (balra), melynek elemihullám transzformáltjának amplitúdó-viszonyai láthatók középen. Az elemihullám transzformált koefficienseiből számolt amplitúdót ábrázoltam a b - c/a(eltolási idő és frekvencia) síkon úgy, hogy az alapfüggvényben  $\kappa=0$  (Morlet-típusú alapfüggvény). Az időben viszonylag közelinek tekinthető beérkezések miatt interferenciás kép alakul ki, az amplitúdó menet felbonthatósága kisebb frekvencián nem megfelelő, a frekvenciakomponensek beérkezési ideje nehezebben jelölhető.

A 3.5. ábra (jobbra)  $\kappa$  különböző értékei mellett is mutatja az elemihullám transzformáció eredményét úgy, hogy benne a 3D tér  $\kappa$  - *b* metszetét ábrázoltam egy adott frekvencia esetén (*c/a*=24 Hz). Az első csatornán  $\kappa$ =0. Az amplitúdó értékek legélesebb maximumai nullától különböző frekvenciaváltozási mértékeknél vannak, vagyis  $\kappa$  adott értékeinél a speciális elemihullám jobb közelítést ad. A felbontóképesség javul, hiszen az adott frekvencián már a két beérkezés külön jelölhető, nem úgy, mint a Morlet-típusú elemihullám esetén (középen).

### 3.5 Következtetések

Az elemihullám transzformációt különböző frekvenciaváltozási sebesség értékekkel megismételve kialakítottam egy 3D teret eredményező eljárást, ahol felhasználtam a szakirodalomban javasolt, de ki nem próbált speciális elemihullámot. A transzformált térben az amplitúdót számolva kijelölhetők az egyes frekvenciáknál azok maximumai, ami a beérkezési idő és frekvencia összefüggését adja. A transzformáció amplitúdó képén minden frekvenciához az amplitúdó csúcsok annál a frekvenciaváltozási sebességnél a legélesebbek, mely megfelel a vizsgálandó jelnek. Független információként a beérkezés frekvenciaváltozási sebessége is megkapható.

A Morlet-féle elemihullámmal való transzformációhoz képest a beérkezés idejének kijelölése zajjal terhelt jelek esetén könnyebb. A különböző beérkezési idejű hullámok szétválaszthatósága jobb lett, illetve a frekvenciaváltozási sebesség független meghatározása további segítséget adott az analízishez, amit példákon keresztül bizonyítottam.

## 4. Valódi vibrátorjel amplitúdó- és fázisviszonyai geofonjelek alapján

A vibrátor által kibocsátott jel harmonikus komponenseinek vizsgálatára, így az alapharmonikus és felharmonikus tartalom amplitúdó- és fázisviszonyainak analizálására eljárást dolgoztam ki, ami alkalmazza az elemihullám transzformációt is. A módszer a vibrátoron mért jeleket összehasonlíthatóvá teszi a geofonon mért jelekkel.

A forrás és az érzékelők esetében a csoportosítást elhagyva kísérleti mérést terveztem, mely hasonlít a jövőben elterjedő mérési technikákhoz és alkalmas a kívánt adatok megszerzésére. A témában elvégzett munkát az eddig megjelent publikációim és új eredmények alapján tárgyalom (Scholtz, 2000; 2002a, 2002b; 2003b; 2003c; 2003d).

#### 4.1 Analizáló módszer

A geofonon mérhető szeizmikus jelet konvolúció eredményeképpen írom fel,

$$s(t) = \sum_{l=0}^{N-1} v_l(t) * w(t) * e(t), \qquad (4.1)$$

ahol feltételezem, hogy a vibrátor által kibocsátott valódi jel egy alapharmonikus (*l*=0) és több felharmonikus komponensből áll össze:

$$v^{s}(t) = \sum_{l=0}^{N-1} v_{l}(t).$$
(4.2)

A képletekben s(t) a geofonjel,  $v^s(t)$  a vibrátor valódi jele,  $v_l(t)$  az egyes harmonikus komponensei, e(t) a föld impulzusra adott válasza, w(t) minden egyéb szűrőhatás összefoglaló jele. A konvolúciót a \* jelenti.

## 4.1.1 Harmonikus komponensek elkülönítése

Ahhoz, hogy a harmonikus komponenseket vizsgálhassam, olyan eljárás kell, ami az időben és frekvenciában elkülönülő jeleket szétválaszthatóvá teszi. A megoldásra számos megközelítés ismeretes az irodalomból, amiket a 3. fejezetben részletesen is tárgyaltam. A legegyszerűbb módszereket leírhatjuk úgy is, mint például különböző középfrekvenciájú keskenysávú szűrések ismételt alkalmazását (MFT - Multiple Filter Technique), vagy futó időablakban elvégzett Fourier transzformációt (STFT – Short-Time Fourier Transformation). A két módszer nagyon hasonló egymáshoz, hiszen amíg az előbbinél először a frekvenciákat választjuk szét és így a jelek időbeli összefüggései is megmutatkoznak, addig a második módszernél előbb időben szeparáljuk az adatokat és azután frekvenciában.

Az elemihullám transzformáció, ami szintén idő - frekvencia analízist tesz lehetővé, teremti meg azt a tárgyalási módot, ami az előbbi módszerek speciális megközelítését általánosítja. Az elemihullám transzformáció és speciális elemihullámmal való alkalmazásának tárgyalása is a 3. fejezetben található, itt csak megismétlem az alapképleteket a könnyebbség kedvéért.

Az s(t) jel elemihullám transzformáltja, a (3.7) képletnek megfelelően,

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int g^*(\frac{t-b}{a}) s(t) dt, \qquad (4.3)$$

ahol  $g^*$  az *a*-val skálázott, illetve *b*-vel eltolt elemihullám komplex konjugáltja. Itt csak *a* pozitív értékeivel foglalkozom, mert csak a pozitív frekvenciák lesznek érdekesek.

A g(t) függvényre egy egyszerű, általánosan használt verzió a Morlet-féle elemihullám, mely a (3.11) összefüggés szerint

$$g(t) = e^{-\frac{t^{2}}{2\sigma^{2}}} e^{i2\pi ct}.$$
 (4.4)

A t az időt jelöli, i az imaginárius egység, c középfrekvencia és  $\sigma$  az időablak szélességét szabályozza.

Az elemihullám transzformáció megteremti annak a lehetőségét, hogy az egyes harmonikus komponenseket időben és frekvenciában elválaszthassuk, ha a szétválasztandó események időben és frekvenciában nem túl közeliek, illetve nem fedik egymást az adott tartományban. Bár egy kísérlet során sok mindent lehetne úgy alakítani, hogy a probléma egyszerűsödjön és a feltételezések teljesüljenek, most azonban az is cél, hogy a jövőbeni mérési módszert minél jobban megközelítve, egy széleskörűen alkalmazható eljáráshoz jussak.

## 4.1.2 A vizsgált hullámtípus

A hagyományos reflexiós szeizmikus méréseknél a szétválaszthatóság feltételei általában nem teljesülnek. Egy reflexiós felvételen sokféle beérkezés megtalálható, amik mind időben, mind pedig frekvenciában átfedik egymást. Nyilvánvalóan a reflexiós beérkezések lennének vizsgálataim tárgyai, hiszen az azokban megjelenő forrásjelek eltávolítása a végső cél. Viszont a reflexiós jelek a leggyengébb beérkezések közé tartoznak, így a véletlen és koherens zajok (például zavarhullámok) elnyomják őket. Egy korrelálatlan terepi felvételen általában a direkthullámok és a refrakciós hullámok dominálnak. Ezek képezik az elsőbeérkezéseket, így időben jól definiáltak. Azokat megelőzően csak a mesterséges jelgerjesztéssel nem összefüggő zajok hatása észlelhető. A későbbi beérkezések már időben átfedésbe kerülnek velük, viszont nem csoportosított rezgéskeltés és észlelés esetén az elsőbeérkezések energiája nagyságrenddel nagyobb, mint a reflexiós beérkezéseké. Energiában a zavarhullámok vetekedhetnek velük, viszont azok megjelenése csak a kisfrekvenciájú tartományban jelentős. Sebességük sokkal kisebb, mint a direkthullámoké és a refraktált hullámoké, így időben elhatárolhatók.

Tehát analizáló módszeremet és kutatásaimat a direkthullámokra koncentrálom, mert azok nagyságrendileg erősebb beérkezést produkálnak, mint más hullámok és időben is jól elhatárolható tartományban jelentkeznek. A többi beérkezés vizsgálataim eredményét zajként befolyásolja, viszont az amplitúdók lényeges különbözősége miatt hatásukat elhanyagolom. A kísérleti elrendezésben nem használok csoportosítást sem a forrás, sem az észlelés oldalán, hogy az általuk létrejött sebességszűrés se csillapítsa azokat, és a csoport tagjainak hatása se zavarja egymást.

4.1.3 Konvolúciós hatások eltüntetése

A direkthullámok alap- és felharmonikus komponenseit az elemihullám transzformált tartományban szeparálom. Az egyes komponenseket szétválasztva, rajtuk külön-külön Fourier transzformációt végzek el.

Fourier transzformáció után

$$WT^{F}(a,f) = \int \left[\frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t)g^{*}(\frac{t-b}{a})dt\right]e^{-i2\pi/b}db,$$
(4.5)

$$WT^{F}(a,f) = \int \frac{1}{\sqrt{a}} [s(b)^{*}g^{*}(b,-a)]e^{-i2\pi jb} db, \qquad (4.6)$$

$$WT^{F}(a, f) = \frac{1}{\sqrt{a}} S(f) G^{*}(-a, f)$$
 (4.7)

Az elemihullám transzformált jel Fourier transzformációja a frekvenciatartományban egyszerű szorzással kapható. Ha az analizáló elemihullám páros függvény, akkor a Li (1997a) által kapott eredmény hasonlít a (4.7) képletre.

Bár az elemihullám transzformáció, majd az azt követő Fourier transzformáció alkalmas a direkthullámok harmonikus komponenseinek szétválasztására, amplitúdóés fázisviszonyainak vizsgálatára, a direkthullámok - terjedésük és észlelésük során - számunkra ismeretlen konvolúciós hatásokat szenvednek. A forrás valódi, tényleges jele még nem kapható meg, ezért további lépésekre van szükség.

A (4.7) képlet alapján, a már eltolási időben szeparált harmonikus komponensek Fourier transzformációja után, képezhető a következő hányados:

$$R_{m,n}^{\nu}(a,f) = \frac{V_m(f)W(f)E(f)G^*(-a,f)}{V_n(f)W(f)E(f)G^*(-a,f)} = \frac{V_m(f)}{V_n(f)} \qquad \text{és} \qquad \frac{c}{a} = f.$$
(4.8)

A nagybetűk az egyes függvények Fourier transzformáltjait jelölik, f a frekvencia, m és n a különböző harmonikus komponensek indexei. A hányados csak az egymást átfedő frekvenciatartományokban értelmezhető. A skálázó paraméter (a) és a frekvencia (f) között az elemihullám középfrekvenciájával (c) teremtünk kapcsolatot.

Látható, hogy a szeizmikus jel konvolúciós komponensei közül a szűrőhatás és a föld átvitele is kiesik, hiszen a hányadost azonos jelcsomag, azonos frekvenciáinak, azonos körülmények közötti terjedése során észlelt, de idő - frekvencia tartományban szétválasztott komponenseinek transzformáltjaiból képeztem. Az elemihullám transzformáció analizáló hulláma se módosítja az eredményt, így maradék gyanánt a vibrátor tényleges jele harmonikus komponensei viszonyairól kapok információt, az ismeretlen hatások nem zavarják vizsgálódásaimat.

Amennyiben a 3. fejezetben tárgyalt speciális elemihullám - a (3.12) képlet szerint - jobb hatásfokát is ki akarom használni, akkor (4.8) számlálójában és nevezőjében célszerűen különböző lesz a  $G^*$  függvény. Mivel  $G^*$  ismert, hatását el lehet távolítani az osztás előtt.

A terepi méréskor természetesen mégis kell ismeretlen zavaróhatásokkal számolni, viszont egy mérés során több tíz, vagy több száz geofon jelének egyidejű észlelése történik. Az egyedi csatornák analízisével kapott adatok még javíthatók a különböző észlelési távolságú geofonokból nyert adatok valamilyen átlag, medián, vagy leggyakoribb értékének képzésével (Steiner, 1990). Dolgozatomban a medián érték számításával csökkentem a zajhatást.

# 4.2 Terepi adatok analízise

A felvázolt analizáló módszerhez az adatokat egy olajkutató ipari mérés során, a mérési elrendezés általam meghatározott módosítása után történt felvételezéssel nyertem. A mérés megegyezik a csoportosított jelgerjesztés szeparációs vizsgálataihoz kivitelezett méréssel, melyet az 1.3 fejezetben már felhasználtam és ismertettem.

# 4.2.1 Kísérleti mérés

A vibrátor gyorsulási adataiból számított földerő közelítés és az általam javasolt analizáló eljárás szolgáltatta adatok összehasonlításához a vibrátoron elhelyezett gyorsulásmérők jeleinek tárolását a vibrátorokon elhelyezett rögzítő berendezések végezték. A középlövéses pontforrás tesztelését az érzékelő oldalon egy helyre "összehúzott", egymástól 25 méterre elhelyezett, 200 db geofoncsoport, mint pontszerű érzékelő támogatta. Egy forráspozícióban egy-egy egyedi rezgéskeltést végeztek. A vibrojel 8-100 Hz-es tartományban és 15 másodperc hosszban, lineárisan változó pillanatnyi frekvenciával került kibocsátásra. A felvételek rögzítése nyersen, korrelálatlanul történt.

A kísérleti mérés adatai lehetővé teszik, hogy az elemihullám és a Fourier transzformáción alapuló analizáló eljárásomat alkalmazzam. Az alap- és felharmonikus hullámkomponensek amplitúdó- és fázisviszonyait meghatározom mind a vibrátoron mért gyorsulásmérő jeleken, mind pedig a geofon terítésen észlelt direkthullámokon.

Az eredmények összevetésével meg kívánom vizsgálni az HFVS módszer egyik alapjának, nevezetesen a vibrátor által kibocsátott jelnek a számított földerő jellel való közelítésének érvényességét is (5. fejezet).

#### 4.2.2 Tipikus felvétel

A **4.1. ábrán** egy felvétel elméleti vibrojellel korrelált, automatikus erősítésszabályozás utáni képe látható. A korrelációt, illetve az erősítésszabályozást azért végeztem el, hogy a korrelálatlan felvételeken felismerhetetlen beérkezések követhetővé váljanak. A forrás- és az érzékelőcsoportok használata nélküli felvételezés eredményeképpen nem történik sebességszűrés.



4.1. ábra. Elméleti vibrojellel korrelált tipikus felvétel AGC művelet utáni képe

A **4.2. ábrán** csatornánkénti normálást alkalmazva és az amplitúdót decibel skála szerint színezve látható, hogy a domináns energia a forrásközeli csatornák direkthullám beérkezéseiben ölt testet, melyek időben is jól elkülöníthetőek. Számottevő energiával még a távolabbi csatornák elsőbeérkezéseit adó refraktált hullámok és a kisfrekvenciával és kis terjedési sebességgel jellemezhető zavarhullámok rendelkeznek. A decibel skála nyomán megállapítható, hogy a direkthullám, a refraktált hullám és a zavarhullám beérkezések amplitúdói mintegy 30 decibel mértékben meghaladják más, most zajnak tekintett beérkezések amplitúdóit. Az idő- és frekvenciabeli elhatárolhatóság, valamint az amplitúdó különbség teszi

lehetővé, hogy a direkthullámok beérkezéseit önmagukban analizálhassam, a majdan számított értékeket más beérkezések ne befolyásolják jelentősen.



4.2. ábra. Csatornánként maximumra normált, decibel skála szerint színezett felvétel

4.2.3 Geofon és gyorsulásmérő jelek elemihullám transzformációja

A **4.3. ábra** egy, a vibrátorhoz közel eső geofon korrelálatlan jelét és elemihullám transzformációja által nyert idő - frekvencia amplitúdó képét tartalmazza. Az adott keretek között a geofonjel ábrázolhatósága a felbontóképesség miatt korlátozott, de így is érzékelhető az amplitúdó változása. A geofonjel nyers állapotában minden beérkezést tartalmaz, de a **4.2. ábra** alapján csak a direkthullám beérkezés számottevő.

Az elemihullám transzformáció által nyújtott képen a direkthullám akár hét harmonikus komponense is megfigyelhető. Jelentkezik még a zavarhullám energiája is időben és frekvenciában elhatárolhatóan, de annak képén már nem különülnek el a felharmonikusok. Megfigyelhető a vibrátor - talaj rezgőrendszer, illetve a hullám terjedése és az érzékelő együttes hatása miatt az eredetileg frekvenciában egyenletes menetűnek tervezett jel erősödése és csökkenése. Ezek a rezonanciajelenségek dominánsan a vibrátor - talaj rezgőrendszer viselkedése miatt lépnek fel. A nagyobb frekvenciák csillapodásában viszont a hullám terjedése során jelentkező abszorpció játszik lényeges szerepet.



**4.3. ábra**. Egy vibrátorhoz közel eső geofon korrelálatlan jele (balra) és elemihullám transzformációja által nyert amplitúdó kép az idő - frekvencia síkon (jobbra)

A vibrátorokban elhelyezett berendezések rögzítették minden egyes vibráláshoz a referencia vibrojelet, a vibrátor talpán elhelyezett gyorsulásmérő jelét, a reaktív tömegre szerelt gyorsulásmérő jelét, valamint a megadott tömegadatokból és a gyorsulási értékekből számított földerő közelítés idősorát is. Mivel a vibrátoros mérések fejlődése során kezdetben a talpi gyorsulást, majd a reaktív tömeg gyorsulását, végül a tömeggel súlyozott összegüket, vagyis a földerőt tekintették arányosnak a geofonon mérhető jellel, így mindhárom függvény viselkedését megvizsgálom. A **4.4. ábra** a vibrátor talpán elhelyezett gyorsulásmérő által, a **4.1. ábra** felvételének elkészítéséhez történt vibrálás során, szolgáltatott jel amplitúdó-viszonyainak idő - frekvencia képét mutatja.

Itt zavaróhatásoktól, például véletlen, illetve koherens környezeti zajoktól még kevésbé kell tartani, mint a geofonon mérhető direkthullám észlelése alatt, hiszen a vibrátor által gerjesztett jelek a vibrátoron mérve igen erősek. Az idő - frekvencia képen a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jeleken kívül más nem is észlelhető. Az ábrán felismerhetők a különböző harmonikus komponensek, még a nyolcadik felharmonikus is. Az amplitúdó változásait itt is a dominánsan érvényesülő vibrátor - talaj rezgőrendszer rezonanciajelenségei uralják.



**4.4. ábra**. A vibrátor talpán elhelyezett gyorsulásmérő jele (balra) és elemihullám transzformációja által nyert amplitúdó kép az idő - frekvencia síkon (jobbra)

A 4.5. ábra a vibrátor reaktív tömegén elhelyezett gyorsulásmérő által szolgáltatott jel amplitúdó-viszonyai idő frekvencia képét mutatja. А zavaróhatásoktól, vagyis véletlen, illetve koherens környezeti zajoktól itt sem kell tartani. Az idő - frekvencia képen a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jeleken kívül más nem észlelhető. Az ábrán elkülöníthetőek a különböző harmonikus Szemrevételezéssel is megállapítható, komponensek. hogy а harmonikus komponensek minden második tagja kisebb súllyal jelentkezik, mint a talpi gyorsulás jelén. A különbséget az okozhatja, amit már Sorkin (1974) észrevett, hogy a vibrátor és a talaj olyan rezgőrendszert alkot, amely aszimmetrikussá válik a talp lefelé és felfelé történő mozgása során. Az amplitúdó változásokat itt is a dominánsan érvényesülő vibrátor-talaj rezgőrendszer rezonanciajelenségei uralják.



**4.5. ábra**. A vibrátor reaktív tömegén elhelyezett gyorsulásmérő jele (balra) és elemihullám transzformációja által nyert amplitúdó kép az idő - frekvencia síkon (jobbra)

A **4.6. ábra** a vibrátor talpán és reaktív tömegén elhelyezett gyorsulásmérő jelek, a talp és reaktív tömeg tömegével súlyozott összegéből származtatott földerő jel és elemihullám transzformációja által nyert idő - frekvencia sík amplitúdó képét mutatja. Az elterjedt gyakorlat szerint ez a jel vezérli a vibrátor visszacsatolási elektronikáját, illetve ennek a jelnek az időbeli deriváltját tekintjük a geofonon mérhető részecskeelmozdulási sebességgel arányosnak és fázisban lévőnek, eltekintve a terjedési idő okozta különbségtől (Baeten és Ziolkowski, 1990). Az ábrán itt is elkülöníthetőek a különböző harmonikus komponensek, amik egyenletesebb lefutásúak, mint a súlyozás és összegzés előtti egyedi gyorsulásjeleké volt.



**4.6. ábra**. A vibrátor talpán és tömegén elhelyezett gyorsulásmérő jelek tömegükkel súlyozott összegéből származtatott földerő jel (balra) és elemihullám transzformációja által nyert amplitúdó kép az idő - frekvencia síkon (jobbra)

4.2.4 Geofonjel harmonikus komponenseinek amplitúdó-viszonyai

A **4.7. ábrán** kapott helyet az első felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányának képe. Az elemihullám transzformáció által nyújtott idő - frekvencia tartományban a harmonikus komponensek egyszerű időkapuzással elválaszthatók. Egy-egy harmonikus komponens komplex értékeinek Fourier transzformációját számoltam, majd a (4.8) képlet alapján az első és az alapharmonikus hányadosát képeztem.

Természetesen csak az egymást átfedő frekvenciatartományban van értelme az osztásnak (jelen esetben ez 16-100 Hz). Sajnos az első felharmonikus, az alapharmonikus frekvenciájánál nagyobb frekvenciáinak, információtartalma így elvész.



4.7. ábra. Az első felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó aránya szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció összefüggés egy felvétel részletén (balra) és a zajok szűrésével származtatott eredmény (jobbra)

A 4.7. ábra baloldalán a felvétel egy részletének képe látható: az amplitúdó arány szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció összefüggés. A felvétel vibrátorhoz közel eső geofonjai kerültek ábrázolásra, hiszen a direkthullám beérkezések itt dominálnak. Sem a refrakciós, sem a zavarhullám beérkezések - különben hasonló nagyságrendű amplitúdói - nem érvényesülhetnek. A zaj hatásától eltekintve az eredmény nem függ az észlelési távolságtól. Ezzel azt látom bizonyítva, hogy a harmonikus komponenseket érő szűrőhatások valóban kiesnek számításaimból. A terítés két oldala között csekély mértékű aszimmetria figyelhető meg, ami a forrás irányfüggését is jelentheti. Dolgozatomban a hatást elhanyagolom, de elemzését további kutatásra érdemesnek tartom. A maradék a forrás tényleges jelének harmonikus komponenseiből kapható amplitúdó arány.

Ahhoz, hogy egyetlen frekvenciafüggő függvényt kapjak, felhasználhatom a terítés számos geofonja által szolgáltatott adatokat. Jelen esetben a kieső értékek elhagyása után minden frekvencián elvégzett medián számítás szolgált a zajszűrés alapjául.

A jobboldalon ábrázoltam a már észlelési távolságtól független amplitúdó arány görbét a terítés geofonjaiból számolva (zöld). Bár a konkrét értékekkel dolgozatom kevésbé foglalkozik, megjegyezhető, hogy 16 Hz után lassú amplitúdó arány növekedés észlelhető egy 36 Hz-nél kialakuló 18 %-os csúccsal, 42 Hz-nél egy minimum, majd 52 Hz-nél újabb maximum következik be.

A 10 % feletti értékek azt jelentik, hogy számottevő energia koncentrálódik a felharmonikus komponensben.

Sajnos az 50 Hz-es frekvenciánál a mérés közelében húzódó elektromos hálózat, ha csekély mértékben is, de zavarta az észlelést, így minden közölt amplitúdó eredménynél a kiugró 50 Hz-es amplitúdó értékeket a 48 Hz-es és az 52 Hz-es frekvenciához tartozó értékek átlagával helyettesítettem. A zavaróhatás mértéke csak a gyenge harmadik és negyedik felharmonikusnál volt számottevő. Amennyiben a digitális geofonok alkalmazása elterjedté válik, ez a hatás jelentősen csökkenhet. Korrektebb eljárás lehet, ha az 50 Hz-es értéknél található időtől független jeleket ott határoznám meg, ahol nincs más beérkezés. Ennek mértékét kiterjeszteném oda, ahol a harmonikus komponenseket regisztrálom és értékét levonnám belőlük.

A 72 Hz-es frekvenciánál a görbének minimuma van, majd a 100 Hz-es végfrekvencia felé növekedés tapasztalható. A 100 Hz körüli hirtelen megugrás az analízis módjának és a jel végének együttes hatása által keletkezett, hiszen ott az alapharmonikus komponens eltűnik, viszont az első felharmonikus még 200 Hz-ig él.





A **4.8. ábrán** a második felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányának képét mutatom be. Az egymást átfedő frekvenciatartomány a jelen esetben 24-100 Hz. Itt a második felharmonikus, az alapharmonikus frekvenciájánál nagyobb frekvenciái, vagyis a 100-300 Hz-es tartomány vész el, bár az ilyen nagy frekvenciák abszorpciója miatt hullámbeérkezés már nehezen észlelhető.

Az ábra baloldalán a felvétel egy részletének képe látható: az amplitúdó arány szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció összefüggés. A vibrátorhoz nagyon közeli néhány geofonjelen észlelhetők zavaróhatások, de ezektől eltekintve az eredmény nem függ az észlelési távolságtól. A terítés két oldala között az aszimmetria gyenge. Az ábra jobboldalán egyetlen frekvenciafüggő amplitúdó arány függvényt ábrázoltam, melyhez felhasználtam a több tíz geofon által szolgáltatott redundáns adatokat. A görbén 24 Hz után a második felharmonikus amplitúdó arányának növekedése észlelhető, majd egy viszonylag egyenletes, 10 %-os értékű, 30-50 Hz-es

tartomány. Egy élesebb minimum következik be 52 Hz-nél. A 60 Hz-es frekvencia környékén ismét maximum van, 80 Hz-nél minimum, majd a 100 Hz-es végfrekvencia felé növekedés tapasztalható. A 100 Hz körüli hirtelen megugrás ismét az analízis módjának és az alapharmonikus jel végének együttes hatása által keletkezett, hiszen a vibrátor egy 0,3 szekundumos ablakfüggvénnyel simítja a jel végét.



4.9. ábra. A harmadik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó aránya szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció összefüggés egy felvétel részletén (balra) és a zajok szűrésével származtatott eredmény (jobbra)

A **4.9. ábrán** a harmadik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányának képét mutatom. Az egymást átfedő frekvenciatartomány, a jelen esetben 32-100 Hz. Itt a harmadik felharmonikus, az alapharmonikus frekvenciájánál nagyobb frekvenciáinak, vagyis a 100-400 Hz-es tartomány információ tartalma vész el, bár az ilyen nagy frekvenciák abszorpciója miatt a zajhatások dominánssá válnak, illetve az alkalmazott mintavételi távolság (2 ms) sem alkalmas már a nagyfrekvenciás jelek rögzítésére.

A baloldalon a felvétel egy részletének amplitúdó arány szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció képe látható. A vibrátorhoz nagyon közeli néhány geofonjelen észlelhető zajhatásokon kívül 50 Hz-nél újra kiugró értékek jelentkeznek. Az eredmény itt sem függ az észlelési távolságtól. A terítés két oldala között aszimmetria nem vehető észre. Az ábra jobboldalán a származtatott függvényt ábrázoltam az 50 Hz-es kiugró érték helyettesítése után.

A görbén 34 Hz felett a harmadik felharmonikus amplitúdó arány növekedése észlelhető, majd 54 Hz-nél éri el 5 % körüli maximumát; 78 Hz-nél minimum, majd a 100 Hz-es végfrekvencia felé növekedés tapasztalható.

Itt is jelentkezik 100 Hz-nél a hirtelen megugrás az analízis módja és az alapharmonikus jel lecsengése által. A származtatott arányfüggvény már nem olyan sima, mint az első és második felharmonikus esetében, mivel a harmadik felharmonikus amplitúdója már csak mintegy fele, vagy harmada az első és második felharmonikus amplitúdóinak, az azonos zajok hatása itt már jobban érvényesül. Az analízis eredménye ennek ellenére még elfogadható marad.

A **4.10. ábrán** a negyedik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányának képét mutatom. Az egymást átfedő frekvenciatartomány 40-100 Hz.

A baloldalon a felvétel egy részletének amplitúdó arány szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció összefüggés képe látható. A vibrátorhoz nagyon közeli néhány geofonjelen észlelhetők zajhatások. A vizsgált negyedik felharmonikus komponens gyengesége miatt újra jelentkeznek az 50 Hz-es kiugró értékek. Az eredmény itt sem függ az észlelési távolságtól és a terítés két oldala között gyenge az aszimmetria.

Az ábra jobboldalán a medián értékek meghatározásával származtatott függvényt ábrázoltam. A görbén 40 Hz után az amplitúdó arány növekedése észlelhető, majd kevésbé jellegzetes frekvenciamenet azonosítható. A 76 Hz-nél jelentkező minimum után, a 100 Hz-es végfrekvencia felé, növekedés tapasztalható.

Itt is jelentkezik 100 Hz körül a hirtelen megugrás az analízis és az alapharmonikus jel végének együttes hatása által. A származtatott arányfüggvény sem olyan sima, mint az első és második felharmonikus esetében.

A negyedik felharmonikus amplitúdó aránya már csak a 2-4 %-os tartományba esik, így az azonos zajok hatása itt is jobban érvényesül, de az analízis eredménye még elfogadható marad.





## 4.2.5 Geofonjel harmonikus komponenseinek fázisviszonyai

A konvolúciós hatások kiszűrését lehetővé tevő analizáló eljárás nemcsak az amplitúdó-, hanem a fázisviszonyokról is szolgáltat adatokat. A számítás nem okoz nehézséget, viszont a származtatott frekvencia és fázisérték összefüggések értelmezése már nem olyan egyszerű. A harmonikus komponensek frekvenciatartományban történő osztásakor kapott komplex értékek fázisa nem más, mint a komponensek fáziskülönbsége. A harmonikus komponensek fáziskülönbségét alapvetően az azonos frekvenciájú részek közötti jelentős (akár másodperc nagyságrendű) időkülönbség határozza meg. A fáziskülönbségre csak -  $\pi/2$  és + $\pi/2$  között kapunk adatokat.





A **4.11. ábra** baloldalán bemutatott kép elkészítéséhez, hasonlóan az amplitúdó arányokhoz, az eddig is analizált felvétel részletén csatornáról-csatornára meghatároztam a direkthullám beérkezés első felharmonikusa és alapharmonikusa közötti fáziskülönbséget.

Megállapítható, hogy a fázisviszonyok alakulását sem befolyásolja a vibrátor és az érzékelő közötti észlelési távolság, hiszen az egyes frekvenciákhoz az észlelési távolságtól független, közel azonos érték tartozik. A konvolúciós hatások az arányképzés által kiestek és csak a tényleges forrásfüggvény fázisviszonyai érvényesülnek. Aszimmetria nem jelentkezik. A zajhatások csak a vibrátor környezetében lévő geofonokon számottevőek.

A jobboldalon ábrázoltam a medián számítás utáni fáziskülönbség függvényt, mely csak a 16-100 Hz-es tartományban érvényes.





A **4.12. ábrán** csatornáról-csatornára követhető a direkthullám beérkezés második felharmonikusa és alapharmonikusa közötti fáziskülönbség. A fázisviszonyok alakulását itt sem befolyásolja a forrás és az érzékelő közötti észlelési távolság, a konvolúciós hatások az arányképzés által kiestek és csak a tényleges forrásfüggvény fázisviszonyai érvényesülnek. A kép a forrás mindkét oldalán azonos jellegű, így aszimmetria nem jelentkezik. A zajhatások csak a vibrátor környezetében lévő csatornák jeleit rontják le.

A jobboldalon a medián számítás után kapott fáziskülönbség függvényt ábrázoltam, mely a 24-100 Hz-es, az adott harmonikus komponensek egymást átfedő tartományában érvényes.





A **4.13. ábra** baloldalán a domináns direkthullám beérkezés harmadik felharmonikusa és alapharmonikusa közötti fáziskülönbséget ábrázoltam. A fázisviszonyok alakulása itt sem függ a forrás és az érzékelő közötti észlelési távolságtól. A kép a forrás mindkét oldalán azonos jellegű, bár már zajosabb, de aszimmetria így sem ismerhető fel.

A zajhatások eltávolítására használt medián számítás után a kapott fáziskülönbség függvényt ábrázoltam az ábra jobboldalán. harmonikus А frekvenciatartománybeli átfedési szakasza: 32-100 Hz. komponensek А fáziskülönbség függvény csak itt értelmezhető. A 80 Hz-es érték feletti frekvenciákon és a távolabbi csatornákon olyan zajhatás érvényesül, amit a medián számítás nem volt képes kiküszöbölni.


**4.14. ábra**. A negyedik felharmonikus és az alapharmonikus fáziskülönbsége szerint színezett frekvencia - észlelési pozíció összefüggés egy felvétel részletén (balra) és a zajok szűrésével származtatott eredmény (jobbra)

A **4.14. ábrán** az általam számított utolsó, a direkthullám negyedik felharmonikusa és alapharmonikusa közötti fáziskülönbséget ábrázolom. A fázisviszonyok alakulása itt is azt bizonyítja, hogy a forrás és az érzékelő közötti észlelési távolság, vagyis a hullám által megtett út hatása és minden egyéb konvolúció az arányképzés által kiesett. A tényleges forrásfüggvény viszonyai érvényesülnek a forrás mindkét oldalán, melyek azonos jellegűek, aszimmetria nélkül. A zajhatások csak a vibrátor környezetében lévő csatornák jelét rontják le. A jobboldalon a medián számítás után kapott fáziskülönbség függvényt ábrázoltam, mely a 40-100 Hz-es, a negyedik és alapharmonikus komponens frekvenciatartománybeli átfedő szakaszán érvényes.

A további harmonikus komponensek arányait már nem mutatom, mert a csökkenő energiatartalmuk miatt a zajhatások rontják meghatározásuk pontosságát,

illetve jelentőségük is csökken, hiszen már csak csekély mértékben járulnak hozzá a teljes jel kialakításához.

#### 4.3 Következtetések

Az általam kidolgozott, elmihullám transzformáción és frekvenciatartománybeli osztáson alapuló analizáló eljárás szétválaszthatóvá teszi a különböző frekvenciaváltozási sebességgel és beérkezési idővel rendelkező jeleket és kiszűri a szeizmikus hullámokat terjedésük és mérésük során érő ismeretlen konvolúciós hatásokat. A módszer eredményeképpen a forrás harmonikus komponenseire jellemző tényleges amplitúdó- és fázisviszonyok válnak tanulmányozhatóvá. A terepi mérések során fellépő zajhatások csökkentésére minden frekvencián - a több észlelési pontban rögzített adatok felhasználásával - a medián érték meghatározását alkalmaztam.

Kialakítottam egy, a jövőbeni reflexiós mérésekhez közelítő kísérleti elrendezést, ahol a geofonokon mérhető direkthullám beérkezések szolgáltatnak adatokat a vibrátor által ténylegesen kibocsátott jelek vizsgálatához.

A kísérleti mérés adatainak feldolgozása alapján megállapítottam, hogy az analizáló eljárás eltávolította a konvolúciós hatásokat és a direkthullám beérkezések alkalmasak a valódi forrásfüggvény harmonikus komponenseinek amplitúdó- és fázisviszonyai meghatározására. Megfigyeléseim az alapharmonikus jelhez képest számított értékekre vonatkoznak, így szűkítve a vizsgált frekvenciatartományt. A számítási módszer azonban kiterjeszthető a felharmonikusok közötti kapcsolatok feltárására is, ahol a nagyobb frekvenciák is szerepet kapnak.

Az amplitúdó-viszonyok alapján kimutattam a vibrátor - talaj rezgőrendszer felharmonikus tartalom növekedést mutató frekvenciáit és meghatároztam a felharmonikus tartalom mértékét.

Bár a konkrét kísérletben lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú vibrojel szerepelt, de az analizáló eljárás alkalmas a nemlineáris vibrojelek vizsgálatára is, hiszen a vibrátor által keltett felharmonikusok akkor is elkülöníthetők, az azonos frekvenciájú részek megfelelő hányadosainak képzésével pedig a konvolúciós hatások eltávolíthatók.

## 5. Vibrátoron és geofonon mért jelek összehasonlítása

A mai gyakorlat és elmélet szerint a vibrátor erőhatásának idő szerinti differenciálás utáni képe a geofonnal mérhető elmozdulási sebesség közelítését adja (például Baeten és Ziolkowski, 1990). A földerő kiszámításához a vibrátor talpán és reaktív tömegén elhelyezett gyorsulásmérők tömeggel súlyozott összege szolgál. Ennek bizonyítására számos kísérleti mérést végeztek, melyek közül többet már megemlítettem. Az irodalomban fellelt munkák némelyike ugyan foglalkozott a felharmonikus tartalommal, de a megállapításaik általában csak az alapharmonikusra vonatkoztak. Mivel a (4.8) képlet alapján sikerült a direkthullám szétválasztott harmonikus komponenseinek, pusztán a forrás tulajdonságait követő, relatív amplitúdó- és fázisviszonyait meghatározni, így itt is lehetőség nyílik arra, hogy a földerő deriváltját számítva összevethessem a kapott közelítő értéket a ténylegesen mért arányokkal.

## 5.1 A vibrátor gyorsulási adatainak analizáló módszere

Allen et. al. (1998) a csoportosított rezgéskeltés szeparációja során úgy írta fel a földerő és a gyorsulásmérő jelek közötti viszonyt, hogy kapcsolatukat a földerőn ható valamilyen lineáris, minimum fázisú, ismeretlen átviteli függvény teremti meg (1. fejezet). A lényegen nem változtatva azt feltételezem, hogy a valódi földerő, F(t), a  $q_l(t)$  komponensekből áll, azaz

$$F(t) = y(t) * \sum_{l=0}^{N-1} q_l(t) = y(t) * \sum_{l=0}^{N-1} [m^{rt} a_l^{rt}(t) + m^{vt} a_l^{vt}(t)],$$
(5.1)

ahol  $m^{rt}$  a vibrátor reaktív tömegét,  $a_l^{rt}(t)$  a vibrátor reaktív tömegének gyorsulását,  $m^{vt}$  a vibrátor talpának tömegét és  $a_l^{vt}(t)$  a reaktív tömeg gyorsulásának harmonikus komponenseit jelöli. Az *l* a harmonikus komponensek indexe, *N* a száma. Az *y*(*t*) pedig egy olyan szűrőfüggvényt jelent, mely a mérőeszközök és a vibrátor mechanikája által okozott, valamint egyéb ismeretlen konvolúciós hatásokat kíván kifejezni.

Az általam vizsgálandó kérdés az, hogy F(t) deriváltja hogyan viszonyul  $v^{s}(t)$ hez, mellyel a (4.2) képletben a vibrátor által kibocsátott valódi jelet jelöltem és később harmonikus komponenseinek relatív viszonyait határoztam meg direkthullámokból.

$$\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} \qquad \Leftrightarrow \qquad v^{s}(t) = \sum_{l=0}^{N-1} v_{l}(t) \tag{5.2}$$

Mivel a geofonjeleken csak az alapharmonikushoz képest sikerült meghatározni az amplitúdó- és fázisviszonyokat, így a földerő deriváltjaira is aktualizálom a (4.8) egyenletet.

$$R_{m,n}^{q}(a,f) = \frac{i2\pi f Q_{m}(f) Y(f) G^{*}(-a,f)}{i2\pi f Q_{n}(f) Y(f) G^{*}(-a,f)} = \frac{Q_{m}(f)}{Q_{n}(f)} \qquad \text{és} \qquad \frac{c}{a} = f.$$
(5.3)

A nagybetűk a megfelelő időfüggvények Fourier transzformáltjai, a  $i2\pi f$  szorzás pedig az idő szerinti deriválást jelenti. Az ismert analizáló elemihullám, g(t), az ismeretlen y(t) függvény és a deriválás is kiesik számításomból. A maradék hányados már csak a konvolúciós hatásoktól megtisztított forrásfüggvény közelítés harmonikus komponenseinek aránya.

## 5.2 Amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlítása

A kísérleti mérések során rögzítésre került mind a vibrátor talpon, mind pedig a reaktív tömegen mért gyorsulás és a belőlük számított földerő, így az (5.3) egyenlet alapján mindhárom jelre számítottam és ábrázoltam az amplitúdó- és fázisviszonyokat, az adott vibráláshoz tartozó terítés geofonjeleiből számítottakkal együtt. Vizsgálataimat számos vibrálás esetén elvégeztem, de terjedelmi okokból ábrákat csak két esetre közlök, a fázisviszonyokra pedig csak az egyikre, mivel jellegükben nem térnek el egymástól.

5.2.1 Az alap- és az első felharmonikus relatív amplitúdó- és fázisviszonyai

Az **5.1. ábra** a konvolúciós hatásoktól megtisztított, első felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányát, valamint a fáziskülönbségeket mutatja a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros) és a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jeleiből számolva. Az amplitúdó-viszonyokat vizsgálva megállapítható, hogy egy adott vibráláshoz tartozóan egyik görbe sem hasonlít a másikra. A földerő közelítés relatív első felharmonikus tartalma jelentősen kisebb, mint amit a geofonjelekből határoztam meg.

A legrégebben visszacsatolási jelként is használt talpi gyorsulás mutatja a legnagyobb első felharmonikus tartalmat, a földerő ettől kisebbet jelez és a reaktív tömeg gyorsulásjelében van a legcsekélyebb súllyal. A geofonjelből származtatott amplitúdó arány görbe csúcsai a vibrátor jeleiben nem jelentkeznek. Ha összevetem a két különböző vibrálási pozícióban számított amplitúdó adatokat, akkor látható, hogy a görbék jellege hasonló, bár a mértékek különbözőek.

A fázisviszonyokra csak az egyik rezgéskeltés adatsorát közlöm (középen). A fáziskülönbség görbék is azt jelzik, hogy a geofonon mérhető első felharmonikus tartalmat nem írja le megfelelően sem a földerő közelítés, sem a számításához használt gyorsulásadat, bár a földerő közelítés 60 Hz felett jó egyezést mutat a geofonon mérhető jelek fázisviszonyaival.



5.1. ábra. Nem egy pozícióban végzett két vibráláshoz tartozó, a konvolúciós hatásoktól megtisztított első felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó arány görbék (balra és jobbra), valamint a fáziskülönbségek (középen, a baloldali ábrarész vibrálásához tartozóan) a terítés geofonjeleiből (zöld) és a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros), a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jelei alapján

5.2.2 Az alap- és a második felharmonikus relatív amplitúdó- és fázisviszonyai

Az **5.2. ábra** a második felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányát, valamint a fáziskülönbségeket mutatja a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros) és a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jeleiből számolva. Az amplitúdó-viszonyokat vizsgálva megállapítható, hogy egy adott vibráláshoz tartozóan jellegében mindegyik görbe hasonlít egymásra. A geofonjel relatív második felharmonikus tartalma 60 Hz felett némileg eltér attól, amit a földerő közelítés alapján határoztam meg.



5.2. ábra. Nem egy pozícióban végzett két vibráláshoz tartozó, a konvolúciós hatásoktól megtisztított, második felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó arány görbék (balra és jobbra), valamint a fáziskülönbségek (középen, a baloldali ábrarész vibrálásához tartozóan) a terítés geofonjeleiből (zöld) és a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros), a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jelei alapján

A régebben visszacsatolási jelként is használt talpi gyorsulás és a reaktív tömeg gyorsulásának második felharmonikusa relatív amplitúdó-viszonyai megegyeznek a földerő jelével. A geofonjelből származtatott amplitúdó arány csúcsai másolják a vibrátoron mértekét. A két vibrálási pozícióban számított amplitúdó adatok viselkedése hasonló.

A fáziskülönbség görbék szinte együtt futnak a 24-100 Hz-ig érvényes tartományban. A geofonon mérhető relatív második felharmonikus tartalmat megfelelően írja le a földerő közelítés, sőt a számításához használt gyorsulásadatok is azzal megegyező eredményre vezetnek. Csak nagyobb frekvencián alakulnak csekély mértékben eltérően az amplitúdó-viszonyok.

5.2.3 Az alap- és a harmadik felharmonikus relatív amplitúdó- és fázisviszonyai

Az **5.3. ábra** a konvolúciós hatásoktól megtisztított harmadik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányát, valamint a fáziskülönbségeket mutatja a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros) és a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jeleiből számolva.

Mind az amplitúdó-, mind pedig a fázisviszonyokat vizsgálva megállapítható, hogy egy adott vibráláshoz tartozóan egyik görbe sem hasonlít a másikra, különösen a geofonjeleken meghatározott arányok térnek el a vibrátor gyorsulási adataiból számított értékektől.

A földerő közelítés relatív harmadik felharmonikus tartalma kisebb, mint amit a geofonjelekből határoztam meg. A korábban visszacsatolási jelként is használt talpi gyorsulás jellegében a földerőhöz hasonló amplitúdó aránnyal rendelkezik. Az amplitúdó arány görbe csúcsai mind a három, vibrátoron meghatározott, jelben felismerhetők.

Ha összevetem a két különböző vibrálási pozícióban számított amplitúdó adatokat, akkor látható, hogy a görbék jellege hasonló, csak a mértékek különbözőek.

A fázisviszonyokra csak egy adatsort közlök, ahol a fáziskülönbség görbék is azt jelzik, hogy a geofonon mérhető harmadik felharmonikus tartalmat nem írja le megfelelően sem a földerő közelítés, sem a számításához használt gyorsulásadatok, melyek a vibrátor talpán és reaktív tömegén kerültek rögzítésre.



5.3. ábra. A harmadik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányai (balra és jobbra), valamint a fáziskülönbségek (középen, a baloldali ábrarész vibrálásához tartozóan) a terítés geofonjeleiből (zöld) és a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros), a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jelei alapján

5.2.4 Az alap- és a negyedik felharmonikus relatív amplitúdó- és fázisviszonyai

Az **5.4. ábra** a negyedik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányát, valamint a fáziskülönbségeket mutatja a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros) és a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jeleiből számolva. Az amplitúdó-viszonyokat vizsgálva megállapítható, hogy egy adott vibráláshoz tartozóan jellegében mindegyik görbe hasonlít egymásra. A geofonjel relatív negyedik felharmonikus tartalma 80-90 Hz környékén némileg eltér attól, amit a földerő közelítés alapján határoztam meg.

A visszacsatolási jelként is használt talpi gyorsulás és a reaktív tömeg gyorsulása negyedik felharmonikusa relatív amplitúdó-viszonyai megegyeznek a földerő jelével. A geofonjelből származtatott amplitúdó arány görbe minimuma 74-76 Hz-nél másolja a vibrátor jeleiben mértekét. A két vibrálási pozícióban számított amplitúdó adatok viselkedése hasonló.

A fáziskülönbség görbék 50 Hz felett szinte együtt futnak a 40-100 Hz-ig érvényes tartományban.

A geofonon mérhető relatív negyedik felharmonikus tartalmat és a fázisviszonyokat megfelelően írja le a földerő közelítés, sőt a számításához használt gyorsulásadatok is ahhoz közelítő eredményre vezetnek.



5.4. ábra. A negyedik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányai (balra és jobbra), valamint a fáziskülönbségek (középen, a baloldali ábrarész vibrálásához tartozóan) a terítés geofonjeleiből (zöld) és a földerő (fekete), a reaktív tömeg (piros), a vibrátor talp (kék) gyorsulásmérő jelei alapján

#### 5.3 Amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlítása korreláció alapján

Az 5.2 részben az összehasonlítást csak leíró jelleggel tettem meg, amit az együttes ábrázolás segített. A közölt hasonlósági megállapításokat most számszerűsítem is a korreláció hagyományos definíciója alapján (Steiner, 1990),

$$r(\xi_i, \xi_k) = \frac{\text{COV}(\xi_i, \xi_k)}{\sqrt{\text{VAR}(\xi_i)\text{VAR}(\xi_k)}},$$
(5.4)

ahol az összehasonlítandó adatrendszerek kovarianciája és varianciája kap szerepet.

Meghatároztam a korrelációs értékeket minden harmonikus komponens arányra, külön-külön a frekvenciafüggő amplitúdó- és fázisgörbékre. Referenciajelként a földerő jel számított értéke szerepel, hiszen eredetileg azt tartják a távoli jel jó közelítésének.

korreláció	első		második		harmadik		negyedik	
a földerő	felharmonikus/		felharmonikus/		felharmonikus/		felharmonikus/	
jel alapján	alapharmonikus		alapharmonikus		alapharmonikus		alapharmonikus	
	amplitúdó	fázis	amplitúdó	fázis	amplitúdó	fázis	amplitúdó	fázis
geofonjel	0.4135	0.4587	0.7419	0.5975	-0.2103	-0.0876	0.8079	0.6727
talp gyorsulás	0.7646	-0.3403	0.9539	0.8381	0.6228	0.3609	0.9526	0.7373
r. tömeg gyorsulás	-0.1078	0.6473	0.9667	0.8252	0.6415	0.4496	0.9713	0.7270

5.1. táblázat. Korrelációs együtthatók

Az **5.1. táblázatban** szereplő korrelációs együtthatók értékei megerősítik az 5.2 részben leírt megállapításokat, hiszen magas pozitív értékeket a második és negyedik felharmonikus komponens esetében kaptam. Tehát az (5.1) képlet alapján számított földerő csak a második és negyedik, vagyis a páros sorszámú felharmonikusok amplitúdó- és fázisviszonyait adja helyesen. A páratlan sorszámú felharmonikusokat nem írja le megfelelően.

#### 5.4 Következtetések

A földerő és a geofonjelekből meghatározott, az alapharmonikusra vonatkozó relatív amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlításából azt a következtetést vonom le, hogy az adott kísérletben a második és a negyedik felharmonikus tartalom jó egyezést mutat, az első és a harmadik felharmonikus relatív amplitúdó arányai és a fáziskülönbségek pedig jelentősen eltérnek. Ez a megállapítás, ha csak egy megjegyzés erejéig is, de szerepel Baeten et al. (2001a) cikkében, vagyis a vibrátor jeleiből számított földerő jel nem mindig jó közelítés a vibrátor tényleges jelének felharmonikusaira.

A direkthullámok vizsgálata során nyert adatok azt mutatják, hogy a páros sorszámú harmonikus komponensek a vibrátoron jól mérhetők és jó közelítését adják a távoli jelnek, vagyis ezek a komponensek a vibrátorhoz köthetők. A páratlan komponensek a vibrátoron és a geofonon másképpen jelentkeznek, a vibrátoron nem mérhető jól a ténylegesen kibocsátott páratlan sorszámú felharmonikus jel. A páratlan sorszámú komponensek megjelenését a vibrátor - talaj rendszerben nagyrészt a talaj határozza meg.

A kísérleti mérés alapján az alapharmonikus komponenst is a páros komponensekhez sorolom és a vibrátoron mért földerő alapharmonikusát a távoli jel jó közelítésének tekintem. A páros komponensek amplitúdó arányaira és fáziskülönbségeire nem kaphattam volna jó közelítést, ha a számított földerő alapharmonikusa, egy amplitúdó és egy fázis konstanstól eltekintve, nem egyezik meg a geofonjeleken meghatározott amplitúdó- és fázisviszonyokkal.

Analízis eljárásom alkalmas minőségellenőrzési feladatok ellátására akkor is, ha a vizsgálatokhoz csak a vibrátoron elhelyezett gyorsulásmérők adatai állnak rendelkezésre. Ha összevetem a földerő, a talpi gyorsulás és reaktív tömeg gyorsulási adataiból számolt relatív értékeket, akkor azok lényeges különbözősége a vibrátor talaj rezgőrendszer aszimmetriája miatt megnövekedett páratlan sorszámú felharmonikus tartalmat jelez.

# 6. Vibrátoron és geofonon mért jelek kombinálása

A kísérleti terepi adatok analízisének segítségével megállapítottam, hogy a kísérletben a vibrátoron mérhető jelek közül a számított földerő páros sorszámú harmonikus komponensei, ideértve a nulladik, vagyis az alapharmonikus komponenst is, jó közelítései a távoli jelnek. A páratlan sorszámú komponensek amplitúdó- és fázisviszonyai, bár csak az alapharmonikushoz képest, de az adott kísérleti elrendezésben a geofonjelek alapján mérhetők. A két adatrendszer elfogadott összetevőit kombinálva előállítható egy olyan közelítő jel, mely ötvözi a jó tulajdonságokat. A cél az lehet, hogy az eredményt egy determinisztikus dekonvolúciós eljárás során felhasználva, az elméleti jellel való korrelációt felváltó, pontosabb eredményre jussunk.

#### 6.1 A vibrátor tényleges jelének kombinációs meghatározási alapelve

Ha az elemihullám transzformációt felhasználva leválasztom a vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból képezhető, F(t) földerő jel alapharmonikusát, akkor (5.1) alapján

$$F_0(t) = y(t)^* q_0(t) = y(t)^* \left[ m^{rt} a_0^{rt}(t) + m^{vt} a_0^{vt}(t) \right],$$
(6.1)

amit az 5. fejezet eredményei szerint jó közelítésnek tartok a távoli jel számításához. A direkthullámok analízise során viszont meghatározhatom az alapharmonikusra normált felharmonikus komponenseket, melyek a valódi, tényleges értékek:

$$R_{m,0}^{\nu}(f) = \frac{V_m(f)}{V_0(f)} \cong \frac{V_m(f)}{i2\pi f Q_0(f)}, \text{ mert} \qquad i2\pi f Q_0(f) \cong V_0(f).$$
(6.2)

Az  $R^{v}(a, f)$  függvény rövidített,  $R^{v}(f)$ , felírásánál figyelembe vettem, hogy f=c/a. Végül kombinálom a kétféle adatrendszert:

$$F^{k}(t) = F_{0}(t) + F_{0}(t) * \sum_{m=1}^{N-1} r_{m,0}^{\nu}(t) = y(t) * \left[ q_{0}(t) + q_{0}(t) * \sum_{m=1}^{N-1} r_{m,0}^{\nu}(t) \right], \quad (6.3)$$

melyben  $F^{k}(t)$  a tényleges földerő kombinált értéke,  $r^{v}_{m,0}(t)$  a frekvenciatartományban meghatározott, alapharmonikusra normált felharmonikusok inverz Fourier transzformáltjaként kapható.

#### 6.2 A vibrátor tényleges jelének lehetséges felhasználása

Mivel a távoli jelben a forrás hatását a földerő időtartománybeli deriváltjával helyettesíthetem, így

$$v^{k}(t) = \frac{\mathrm{d}F^{k}(t)}{\mathrm{d}t} = \sum_{l=0}^{N-1} v_{l}^{k}(t) \cong v^{s}(t) = \sum_{l=0}^{N-1} v_{l}(t), \qquad (6.4)$$

ahol  $v^k(t)$  a kombináció útján nyert földerő jel alapján számított vibrátorjel,  $v^s(t)$  a vibrátor által ténylegesen kibocsátott jel.

A geofon jelét (4.2) képlete alapján frekvenciatartományban felírva:

$$S(f) = \sum_{l=0}^{N-1} V_l(f) W(f) E(f), \qquad (6.5)$$

ahol a nagybetűk a megfelelő konvolúciós tagok frekvenciatartománybeli képét jelölik. Determinisztikus dekonvolúció után

$$\frac{S(f)}{V^{k}(f)} = \sum_{l=0}^{N-1} \frac{V_{l}(f)}{V_{l}^{k}(f)} W(f) E(f) \cong W(f) E(f),$$
(6.6)

ahol eredményképpen már csak egy ismeretlen szűrőhatás és a föld rétegsorának átviteli karakterisztikája marad. Minimum fázisú szűrőhatást feltételezve a W(f), időtartományban w(t), statisztikus dekonvolúcióval eltávolítható. Az elméleti jellel való korrelációhoz képest várható, hogy az elemihullám nem torzul a valódi forrásjel és az elméleti jel különbözősége miatt, illetve a felharmonikusok okozta zaj itt jelként hasznosul.

#### 6.3 A felharmonikus komponensek nagyobb frekvenciái hasznosítása

Az alapharmonikusra való normálás miatt a felharmonikusokban jelenlévő, az alapharmonikusénál nagyobb, frekvenciák információtartalma elvész. Egy kicsit

bonyolultabb eljárással még a nagyobb frekvenciák is megtarthatók, hiszen a vibrátor gyorsulásadataiból számítható földerő közelítés összes páros sorszámú felharmonikusát is a távoli jel meghatározásához jó közelítésnek tekintem az 5. fejezet vizsgálatai alapján. Ekkor a direkthullám beérkezésekből a páratlan sorszámú felharmonikusokat a náluk eggyel alacsonyabb és magasabb páros sorszámú felharmonikusokhoz képest is meg kell meghatározni,

$$R_{m,m+1}^{\nu}(f) = \frac{V_m(f)}{V_{m+1}(f)} \cong \frac{V_m(f)}{i2\pi f Q_{m+1}(f)},$$
(6.7)

$$R_{m,m-1}^{\nu}(f) = \frac{V_m(f)}{V_{m-1}(f)} \cong \frac{V_m(f)}{i2\pi f Q_{m-1}(f)},$$
(6.8)

ahol m=1,3,5,... A számítást azért kell mindkét szomszédos páros komponenshez képest elvégezni, mert a páratlan komponensek teljes frekvenciatartalma csak így kerülhet fedésbe a páros felharmonikusok frekvenciatartalmával.

A gyorsulásmérő jelekből számított földerő nulladik és páros sorszámú felharmonikus komponenseit is meg kell tartani a földerő kombinált adatokból való közelítő meghatározásához.

$$F_{e}(t) = y(t) * \sum_{l=0,2,4,6,\dots}^{N-1} q_{l}(t) = y(t) * \sum_{l=0,2,4,6,\dots}^{N-1} [m^{rt} a_{l}^{rt}(t) + m^{vt} a_{l}^{vt}(t)],$$
(6.9)

ahol  $F_e(t)$  a gyorsulásadatok páros harmonikus komponenseiből számított földerőt jelenti.

A (6.7) és (6.8) képlet alapján van relatív ismeretem a direkthullámok páratlan komponenseiről és kombinálhatom a kétféle jelsereget,

$$F^{k}(t) = F_{e}(t) + y(t) * \sum_{m=1,3,5\dots}^{N-1} q_{m+1}(t) * r_{m,m+1}^{\nu}(t) + y(t) * \sum_{m=1,3,5\dots}^{N-1} q_{m-1}(t) * r_{m,m-1}^{\nu}(t). \quad (6.10)$$

Az összefüggést az időtartományban adtam meg. A számításokból ki kell hagyni az  $R^{\nu}_{m,m+1}(f)$  és  $R^{\nu}_{m,m-1}(f)$  átfedő szakaszait. Ezzel a megközelítéssel a teljes rendelkezésre álló frekvenciatartomány információtartalma hasznosítható és egy determinisztikus dekonvolúció során felhasználható.

## 6.4 Módszer a vibrátor tényleges jelének gyakorlati meghatározására

Eltekintve az alapharmonikus frekvenciatartalmánál nagyobb frekvenciák hasznosításától, kidolgoztam egy, a gyakorlatban is használható egyszerűsített eljárást, mely a (6.3) eredményre vezet. Az alapharmonikus leválasztását és az összes felharmonikus alapharmonikushoz képest történő relatív meghatározását, majd a kombinált jel előállítását néhány lépésben teszi lehetővé.

A 4. fejezetben bemutatott analizáló eljárás az elemihullám transzformációt használta a harmonikus komponensek szétválasztására. Ha az analizáló elemihullám a lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jellel modulált Gauss-típusú függvény, akkor az eljárás, szélső esetben (az ablakfüggvény szélessége lefedi az analizálandó jelet), az elméleti vibrojellel való korrelációnak is tekinthető. Ekkor viszont a **2.5. ábrának** megfelelő kép alakul ki, ahol időben szétválaszthatóak az alap- és felharmonikus komponensek.

A felharmonikusok determinisztikus dekonvolúciója után, melyet az alapharmonikussal végzek, előállítható az ismeretlen konvolúciós hatásoktól megtisztított jel. Ha a geofonjelek direkthullámain végzem el a számítást, akkor a terítés geofonjelein zajszűrést is végezhetek, például medián szűrést, mely végeredményképpen egyetlen, összes felharmonikust az tartalmazó, az alapharmonikussal dekonvolvált időjelre vezet.

A vibrátor földerő jeléből hasonlóan választható le az alapharmonikus komponens. A földerő alapharmonikusa és a direkthullámok harmonikus komponensei dekonvolvált jelének konvolúciójával és a földerő alapharmonikusa hozzáadásával jöhet létre az a jel, mely kombinálja a két mérés megfelelő jóságú részét. A végeredmény a földerő újszerű meghatározása, mellyel a távoli jel már a felharmonikusokra nézve is jól leírható.

Az eljárás képletekkel való megadásához korrelálom a geofon jeleit az elméleti alapharmonikusnak megfelelő vibrojellel,

$$S(f)V_0^{e^*}(f) = W(f)E(f)[V_0^{e^*}(f)V_0(f) + V_0^{e^*}(f)\sum_{l=1}^{N-1}V_l(f)],$$
(6.11)

ahol S(f) geofonjelet,  $V_0^{e*}(f)$  az elméleti vibrojel komplex konjugáltját, W(f) az összes szűrőhatást, E(f) a föld hatását,  $V_0(f)$  a valódi vibrojel alapharmonikusát,  $V_l(f)$  a felharmonikusokat jelöli a frekvenciatartományban. Az elméleti és valódi vibrojel alapharmonikusainak korrelációja egy torzított Klauder-féle elemihullámot eredményez, amely a direkthullám beérkezés idejének környékére koncentrált jelként elválasztható a felharmonikusoktól. Korreláció után a felharmonikusok az eredeti beérkezések idejétől korábban, akár a negatív időtartományban jelentkeznek. Ha a szétválasztás után osztom őket a frekvenciatartományban (determinisztikus dekonvolúció), előáll a konvolúciós hatásoktól megtisztított, az alapharmonikusra normált jel:

$$P(f) = \frac{\sum_{l=1}^{N-1} V_l(f)}{V_0(f)}.$$
(6.12)

Inverz Fourier transzformáció után időtartománybeli képet kapok.

Ha a geofonjelek direkthullámain végzem el a számítást, akkor több geofon jelén zajszűrést végezhetek, a jelen esetben medián szűrést, mely végeredményképpen egyetlen, az összes felharmonikust tartalmazó, az alapharmonikussal dekonvolvált időjelre vezet.

A következő lépésben a vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból számított földerő jelnek az alapharmonikus komponensét kell meghatározni. Frekvenciatartományban írva fel a képletet

$$F(f)V_0^{e^*}(f) = Y(f)[V_0^{e^*}(f)Q_0(f) + V_0^{e^*}(f)\sum_{l=1}^{N-1}Q_l(f)],$$
(6.13)

ahol az elméleti vibrojel alapharmonikusának,  $V_0^e(f)$ , és a tényleges vibrojel alapharmonikusának,  $Q_0(f)$ , korrelációja képezi a Klauder-féle elemihullámot, mely a csekély mértékű eltérésük miatt torzított lesz. A negatív időtartományban a felharmonikusok korreláció utáni jelcsomagja észlelhető, melyek így időben leválaszthatók. A korreláció inverzének végrehajtása után már csak az alapharmonikus komponens marad.

$$F_0(f) = \frac{Y(f)V_0^{e^*}(f)Q_0(f)}{V_0^{e^*}(f)} = Y(f)Q_0(f).$$
(6.14)

Mivel feltételezem, hogy

$$i2\pi f Q_0(f) \cong V_0(f),$$
 (6.15)

így kombinálhatom (6.14) és (6.12) tartalmát a (6.3) összefüggésnek megfelelően.

Most a frekvenciatartományban adom meg a végeredményt,

$$F^{k}(f) = F_{0}(f) + F_{0}(f)P(f) = Y(f)Q_{0}(f) + Y(f)Q_{0}(f)\sum_{l=1}^{N-1} \frac{V_{l}(f)}{V_{0}(f)}.$$
(6.16)

## 6.5 A vibrátor tényleges jelének kombinációs meghatározása terepi adatokon

A kísérleti mérés során szerzett adatok alkalmasak a vibrátor tényleges földerő jelének közelítő meghatározására is. Az adatokon a (6.11)-(6.16) képletek alapján végeztem el a számítást, így csak az alapharmonikus frekvenciatartományában kaptam meg a földerő közelítő jelét.

Az előállított idősoron az elemihullám transzformáción és a konvolúciós hatások eltávolításán alapuló eljárást (4. fejezet) alkalmazva a különböző felharmonikusokra kiszámítottam az amplitúdó- és fázisviszonyokat leíró görbesereget. Az eredményeket összevetem az eredeti, csak gyorsulási adatokból számított földerő közelítéssel, valamint a referenciának elfogadott, a geofonok jeleiből számított arányokkal. Adatokat csak egy felvételre közlök.

Az elvárás az, hogy a kombinált jel olyan felharmonikus tartalommal bírjon, mint ami a geofonokon észlelhető, de alapharmonikus komponense a vibrátoron mért gyorsulási adatokból származzon.

A **6.1. ábrán** mutatom be a konvolúciós hatásoktól megtisztított első felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó arányát, valamint a fáziskülönbségeket. Az összehasonlításban szerepelnek a terítés geofonjeleiből, az eredeti földerő és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés jeleiből számolt frekvenciamenetek.

Ahogy azt már korábban bemutattam (5. fejezet), az első felharmonikus komponens és az alapharmonikus aránya az eredeti földerő jelben jelentős eltérést mutatott a geofonokon meghatározott arányokhoz képest. A zöld és a fekete görbe nagy eltérést mutat. Az új eljárás szerint kombinált adatok alapján egy olyan földerő közelítést állítottam elő (lila), mely jól követi a geofonok jeleiben megfigyelt arányviszonyokat (zöld). Ez alátámasztja azt, hogy az eredeti földerő jelben és a geofonokon jeleiben meglévő - de önmagában, konvolúciós hatásoktól mentesen nem

meghatározható - alapharmonikusok jó egyezésben vannak (a deriválástól és az időtolástól eltekintve).

A fázisviszonyok alakulásáról is hasonlók mondhatók el, bár kis frekvenciákon, 20 Hz környékén, nem sikerült jól a kombináció útján nyert jel előállítása. Ennek oka lehet az alacsonyabb jelszint, így a meghatározás bizonytalansága, vagy a feltételezések hibája is.



**6.1. ábra**. A konvolúciós hatásoktól megtisztított első felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó aránya (balra), valamint a fáziskülönbségek (jobbra) a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete), valamit a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés (lila) jeleiből

A **6.2. ábrán** a konvolúciós hatásoktól megtisztított második felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó arányát, valamint a fáziskülönbségeket mutatom be. Az összehasonlításban szerepelnek a terítés geofonjeleiből, az eredeti földerő és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés jeleiből számolt frekvenciamenetek. A második felharmonikus komponens és az alapharmonikus amplitúdó aránya az eredeti

földerő jelben, a nagyobb frekvenciákat leszámítva, nem mutatott jelentős eltérést a geofonokon meghatározott arányokhoz képest.

Az eredeti földerő jelből leválasztott alapharmonikust megtartva és kombinálva a geofonokon meghatározott felharmonikus arányokkal, egy olyan földerő közelítés állt elő, mely még jobban követi a geofonok jeleiben megfigyelt arányokat, erősítve azt a megállapítást, hogy az eredeti földerő jelben és a geofonok jeleiben meglévő alapharmonikusok jó egyezésben vannak.

A fázisviszonyokban is szorosabb együttfutást sikerült elérni, néhány kiugró értéktől eltekintve.



6.2. ábra. A konvolúciós hatásoktól megtisztított második felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó aránya (balra), valamint a fáziskülönbségek (jobbra) a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete) és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés (lila) jeleiből

A **6.3. ábrán** láthatóak a harmadik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányai, valamint a fáziskülönbségek. Bemutatásra kerülnek a terítés

geofonjeleiből, az eredeti földerő (fekete) és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés jeleiből számolt frekvenciamenetek.

A harmadik felharmonikus komponens és az alapharmonikus aránya, az elsőhöz hasonlóan, az eredeti földerő jelben jelentős eltérést mutatott a geofonokon meghatározott arányokhoz képest. A zöld és a fekete görbe egymáshoz képest lényeges eltérést mutat.



6.3. ábra. A konvolúciós hatásoktól megtisztított harmadik felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó aránya (balra), valamint a fáziskülönbségek (jobbra) a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete) és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés (lila) jeleiből

Az eredeti földerő jelből leválasztott alapharmonikust megtartva, majd kombinálva a geofonokon meghatározott felharmonikus arányokkal, egy jobb földerő közelítés állt elő, mely jobban követi a geofonok jeleiben megfigyelt arányokat. Sajnos 35 Hz környékén és 75 Hz felett nem sikerült biztosítani a geofonok jelein számítottakat. A fázisviszonyokról is hasonlók mondhatók el, bár kisfrekvenciákon, 40 Hz környékén, itt sem jó a kombináció útján nyert jel.

A hibák okai a relatíve magasabb zaj- és az alacsonyabb jelszintben keresendők, melyek a meghatározás bizonytalanságát okozzák, továbbá szerepet játszhatnak a feltételezések hibái is.



6.4. ábra. A konvolúciós hatásoktól megtisztított negyedik felharmonikus és alapharmonikus amplitúdó aránya (balra), valamint a fáziskülönbségek (jobbra) a terítés geofonjeleiből (zöld), a földerő (fekete) és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés (lila) jeleiből

A **6.4. ábrán** az utolsóként meghatározott negyedik felharmonikus és az alapharmonikus amplitúdó arányai (balra), valamint a fáziskülönbségek (jobbra) kerültek bemutatásra. Segítségükkel a terítés geofonjeleiből (zöld), az eredeti földerő (fekete) és a kombinációjuk útján nyert földerő közelítés (lila) jeleiből számolt frekvenciamenetek tanulmányozhatók.

A negyedik felharmonikus komponens és az alapharmonikus aránya az eredeti földerő jelben, páros sorszámúként is, csak gyengébb egyezést mutatott a geofonokon meghatározott arányokkal összevetve, mivel a jelszint csökkenésével itt a legnagyobb a meghatározás bizonytalansága. A zöld és a fekete görbe egymáshoz képest eltérést mutat.

Az eredeti földerő jelből leválasztott alapharmonikus megtartásával, majd a geofonokon meghatározott felharmonikus arányokkal kombinálva, előállt az újabb földerő közelítés (lila), mely néhány görbeszakaszon már jobban követi a geofonok jeleiben megfigyelt arányokat (zöld). Bizonyos frekvenciákon kiugró értékek jelentkeznek, így nem mindig sikerült biztosítani a geofonok jelein számított arányokat.

A fázisviszonyok estében jobb egyezés volt az eredeti földerő jellel, de még ehhez képest is sikerült javulást elérni. A kiugró értékeknél figyelembe vehető, hogy a fázisértékek meghatározása során kis hiba esetén is fázisfordulás állhat elő  $\pm \pi/2$ környezetében, amit a korrelációs együttható számításánál nem veszek figyelembe.

# 6.6 Amplitúdó- és fázisviszonyok összehasonlítása korreláció alapján

A 6.5 rész leíró jellegű összehasonlítását számszerűsítettem is a korreláció (5.4) képlete alapján. Meghatároztam a korrelációs értékeket minden harmonikus komponensre, külön-külön az amplitúdó- és fázisviszonyokra. Referenciajelként a geofonjelből számított forrásfüggvény arányok számított értéke szerepel, hiszen azt kívánom elérni, hogy a kombináció útján nyert földerő jel is hasonló tulajdonságokkal bírjon.

korreláció	első		második		harmadik		negyedik	
geofonjel	felharmonikus/		felharmonikus/		felharmonikus/		felharmonikus/	
alapján	alapharmonikus		alapharmonikus		alapharmonikus		alapharmonikus	
	amplitúdó	fázis	amplitúdó	fázis	amplitúdó	fázis	amplitúdó	fázis
földerő	0.4135	0.4587	0.7419	0.5975	-0.2103	-0.0876	0.8079	0.6727
kombinált földerő	0.9700	0.8880	0.9385	0.9515	0.5618	0.5950	0.7695	0.6327

6.1. táblázat. Korrelációs együtthatók

A **6.1. táblázat** bizonyítja az eljárás sikerét. Az eredeti, a vibrátoron mérhető gyorsulásadatokból számított földerő amplitúdó- és fázisviszonyai, valamint a geofonjelekből származtatott amplitúdó- és fázismenetek korrelációja a páratlan sorszámú harmonikus komponensek esetén gyenge.

Az eredeti földerő jel alapharmonikusa és a geofonjelekből leválasztott felharmonikusok alapharmonikussal dekonvolvált komponensei kombinálásával nyert jel és a geofonjelekből származtatott amplitúdó- és fázismenetek korrelációja, a negyedik felharmonikus kivételével, erősebb.

Teljesült a kitűzött cél: a valódi forrásfüggvénynek megfelelő, a távoli jel közelítésére alkalmasabb földerő jel előállítása.

## 6.7 Következtetések

A geofonok jeleiből csak relatív amplitúdó- és fázisviszonyokat határoztam meg, viszont a vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból számított földerő páros sorszámú komponensei, ideértve az alapharmonikus komponenst is, a távoli jel jó közelítését adták. A két adatrendszert kombinálva kidolgoztam két új módszert, ami a felharmonikus komponenseket is jól közelítő földerő jel számítását eredményezi. Az egyszerűbb eljárás csak az alapharmonikus frekvenciatartományában működik, a bonyolultabb hasznosítja a felharmonikusok nagyobb frekvenciáit is.

A kísérleti mérés adatain elvégeztem a földerő jel kombinált meghatározását az egyszerűbb módszerrel, melynek amplitúdó- és fázisviszonyait összehasonlítottam az eredeti számított földerő jel, illetve a geofonokból meghatározott forrásjel amplitúdó- és fázisviszonyaival. A kombináció eredményeképpen a felharmonikus viszonyokat jobban leíró földerő közelítéshez jutottam, amit a kiszámított korrelációs együttható értékek is bizonyítanak.

# Összefoglalás

Dolgozatomban vibrátoros rezgéskeltéssel és egyedi érzékelőkkel végezhető szeizmikus reflexiós mérések témakörében, a csoportosított forrás jelének szétválasztásához is használt vibrátorjel analízisével, meghatározásának lehetőségeivel foglalkoztam, különös tekintettel a felharmonikus tartalomra.

A jelenlegi eljárások pontatlansága, vagy nehézkessége miatt kutatásom célja egy olyan analizáló eljárás kifejlesztése volt, amely a rutinszerű mérésekhez hasonlító elrendezésben is szolgáltat adatot a valódi forrásfüggvény amplitúdó- és fázisviszonyairól. Továbbá célul tűztem ki a valódi földerő közelítő meghatározására egy olyan új módszer megalkotását, ami a felharmonikus tartalom szempontjából is megfelelően működik.

Munkám során áttekintettem a hagyományos mérésekben használt érzékelő- és forrásoldali csoportosítás hatásait és az egyedi források egyedi érzékelőkkel való észlelésének előnyeit. Bemutattam a vibrátoros mérési módszer fejlődését, a harmonikus torzítás okozta korrelációs zaj elnyomására tett próbálkozások szempontjából.

Tárgyaltam a változó frekvenciájú jelek vizsgálatához, így a vibrátorjelekhez is használható módszerek fejlődését, amelyben az elemihullám transzformáció (wavelet transformation) teremti meg több megközelítés egyesített leírását. Megvizsgáltam a szakirodalomban csak elméletileg tárgyalt speciális elemihullámmal végezhető transzformáció alkalmazhatóságát és szintetikus adatok segítségével összehasonlítottam az általánosan használt Morlet-féle elemihullám alkalmazásával. A speciális, lineárisan változó pillanatnyi frekvenciájú jel által modulált Gauss-típusú alapjel felhasználásával egy 3D teret eredményező analízist dolgoztam ki, amivel közvetlenül kaptam információt frekvenciaváltozás sebességére, a jobb felbontóképességet értem el és a módszer zajhatásokra való érzékenysége kisebb lett. Az eljárás pozitív tulajdonságait szintetikus és gyakorlati példákon igazoltam.

A dolgozatban bemutattam egy, a gyakorlati mérésekhez közelítő kísérleti elrendezést, ahol a felszínen elhelyezett geofonokon észlelhető direkthullám beérkezések nyújtanak segítséget a vibrátor által ténylegesen kibocsátott jel analíziséhez. Kidolgoztam egy elemihullám transzformáción és frekvenciatartománybeli osztáson alapuló feldolgozási eljárást, amellyel eltávolíthatók a szeizmikus jeleket terjedésük és mérésük során érő ismeretlen konvolúciós hatások és a forrásra jellemző relatív amplitúdó- és fázisviszonyok tanulmányozhatóvá válnak. A kísérleti mérés adatait vizsgálva megállapítottam, hogy az analizáló módszer valóban kiszűrte a konvolúciós hatásokat. Az alapharmonikus jelhez képest meghatároztam a vibrátoros forrásra jellemző, annak tényleges kimenő jelében, a harmonikus torzítás által létrejött, felharmonikus hullámok relatív amplitúdó- és fázisviszonyait.

Összehasonlítottam a felszínen elhelyezett geofonok direkthullám beérkezései és a vibrátor gyorsulási adatai alapján meghatározott forrásjel relatív amplitúdó- és fázisviszonyait. A kísérleti mérés igazolta az irodalomból ismert megállapításokat, miszerint a felharmonikusok közül csak a páros sorszámmal bíró komponensek esetében igaz a gyorsulási adatokból számított földerő jósága. A páratlan sorszámú felharmonikusok jelentősen eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek, vagyis a vibrátoron nem mérhető a tényleges kimenő jel. Megállapítottam, hogy a vibrátoron mérhető gyorsulási adatok alapján következtetni lehet a valódi kimenő jel páratlan sorszámú felharmonikus komponensei és a számított földerő eltérésére, mert ekkor a vibrátor talpának, reaktív tömegének és a számított földerő jelnek relatív amplitúdó- és fázisviszonyai nem egyeznek meg. A páros sorszámú felharmonikus komponensek

Mivel a geofonok jeleiből csak relatív amplitúdó- és fázisviszonyokat sikerült meghatározni, javaslatot tettem két módszerre, melyek kombináció útján nyerik a valódi földerő jelet. Az egyszerűbb eljárásban a vibrátoron mérhető gyorsulási adatokból számított földerő alapharmonikus komponensének jóságát elfogadva egy korrelációt és annak inverzét alkalmazó, valamint determinisztikus dekonvolúciót tartalmazó technikát fejlesztettem ki. A módszer kombinálja a vibrátor gyorsulási és a geofonjelek adatait egy olyan földerő jel előállításához, mely felharmonikus tartalmában is a tényleges viszonyokat tükrözi, az alapharmonikusa pedig, a jó közelítést nyújtó, számított földerő jelből származik.

A kísérleti mérés adatain elvégeztem a földerő jel kombinált meghatározását az egyszerűbb eljárással. A nyert adatokat összehasonlítottam a vibrátor adataiból számított földerő jel, illetve a geofonok jeleiből meghatározott forrásjel relatív amplitúdó- és fázisviszonyaival. A kombináció eredményeképpen a felharmonikus viszonyokat jobban leíró földerő közelítéshez jutottam, amit a korrelációs együtthatók megnövekedett értékei is bizonyítottak.

A dolgozat eredményei hozzájárulhatnak a csoportosított vibrátoros mérések jelei szétválasztásának tökéletesítéséhez és a korrelációs technikát felváltó, a valódi dekonvolúció vibrátorjelet determinisztikus során felhasználó alkalmazások elterjedéséhez, biztosítva а szeizmikus reflexiós mérések megnövelt felbontóképességét.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok témavezetőmnek, Dr. habil. Dobróka Mihály tanszékvezető egyetemi tanárnak, a műszaki tudományok doktorának, aki nemcsak szakmai vezetésével támogatta disszertációm elkészítését, hanem egyetemi tanulmányaim alatt megismertetett a tudományos kutatás módszereivel.

Köszönettel tartozom Dr. Bodoky Tamás igazgatónak, a műszaki tudomány kandidátusának, hogy szakmai fejlődésemhez és disszertációm elkészítéséhez munkahelyem vezetőjeként a legmegfelelőbb körülményeket biztosította.

Köszönetemet fejezem ki Dr. Ádám Oszkár címzetes egyetemi tanárnak, a műszaki tudomány kandidátusának, hogy az általa vezetett, az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatását élvező kutatásokban részt vehettem.

Ezúton köszönöm a GES Kft.-nek, személy szerint Dr. Gombár Lászlónak, a kísérleti mérések elvégzését és az adatok rendelkezésemre bocsátását.

Köszönetet mondok Dr. Fancsik Tamásnak, a műszaki tudomány kandidátusának, a disszertációm készítése során tett hasznos észrevételeiért.

Köszönöm Dr. Nyári Zsuzsannának és Hegybíró Zsuzsannának, hogy disszertációm szerkesztési szempontjaihoz hasznos tanácsokkal szolgáltak.

Külön emlékezek meg Szüleimről és Családomról, akik folyamatos biztatásukkal és támogatásukkal járultak hozzá disszertációm elkészültéhez, amit bánatunkra Édesapám már nem vehet kézbe.

## Irodalomjegyzék

- ALLEN, K. P., JOHNSON, M. L. and MAY, J. S., 1998, High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS) Method for Acquiring Seismic Data, 1998 SEG Expanded Abstracts.
- ANSTEY, N. A., 1964, Correlation techniques A review, Geophysical Prospecting, 12, 355-382.
- ÁDÁM, O., 1987. Szeizmikus kutatás I.-II., Tankönyvkiadó.
- BAETEN, G. J. M., BELOUGNE, V., COMBEE, L., KRAGH, E., LAAKE, A., MARTIN, J., ORBAN, J., ÖZBEK, A. and VERMEER, P. L., 2000, Acquisition and processing of point receiver measurements in land seismic, 2000 EAGE Expanded Abstracts, B-06.
- BAETEN, G. J. M., BELOUGNE, V., DALY, M., JEFFRYES, B. and MARTIN, J. E., 2001a, Acquisition and processing of point source measurements in land seismic, 2001 SEG Expanded Abstracts.
- BAETEN, G. J. M., COMBEE, L. and WEST, L., 2001b, Static corrections on single sensor data, 2001 EAGE Expanded Abstracts, IS-1.
- BAETEN, G. and ZIOLKOWSKI, A., 1990. The Vibroseis Source, Elsevier Science Publishing Co.
- BAKI, Gy., BODOKY, T., CZILLER, E. and SCHOLTZ, P., 1988, Possibilities and limitations of recompressive filtering in the processing of seam-wave seismic surveys, Geophysical Transactions, 33, 221-236.
- BARANIUK, R. G. and JONES, D. L., 1993, Shear madness: New orthonormal bases and frames using chirp functions, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 41, no. 12, 3543-3549.
- BARNES, A. E., 1996, Theory of 2-D complex seismic trace analysis, Geophysics, vol. 61, no. 1, 264-272.
- BERNHARDT, T. and PEACOCK, J. H., 1978, Encoding techniques for the vibroseis system, Geophysical Prospecting, 26, 184-193.
- BLACQUIÉRE, G. and ONGKIEHONG, L., 2000, Single sensor recording: anti-alias filtering, perturbations and dynamic range, 2000 SEG Extended Abstracts.
- BODOKY, T., RUMPLER, J., HALMOS, P., APOR, L., 1979, A vibrátor talaj rendszer rezonanciajelenségei, Magyar Geofizika, XX., 6. sz., 201-210.
- BRITTLE, K. F., LINES, L. R. and DEY, A. K., 2001, Vibroseis deconvolution: a comparision of cross-correlation and frequency-domain sweep deconvolution, Geophysical Prospecting, 49, 675-686.
- BUCHANAN, D. J. and JACKSON, P. J., 1983, Dispersion relation extraction by multi-trace analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 73, 391-404.
- CAPON, J. GREENFIELD, R. J. and LACOSS, R. T., 1969, Long-period signal processing results for the large aperture seismic array, Geophysics, vol. 34, 305-329.
- CHAKRABORTY, A. and OKAYA, D., 1995, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods, Geophysics, vol. 60, no. 6, 1906-1916.

- COHEN, J. K. and STOCKWELL, Jr. J. W., 2000, CWP/SU: Seismic Unix Release 34: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- COMBES, J. M., GROSSMAN, A. and TCHAMITCHIAN, Ph., 1989. Wavelets: Timefrequency methods and phase space, Springer-Verlag, Berlin.
- COOLEY, J. W. and TUKEY, J. W., 1965, An algorythm for the machine calculation of complex Fourier series, Mathematics of Computation, 19, 297-301.
- CRAWFORD, J. M., DOTY, W. E. N. and LEE, M. R., 1960, Continuous signal seismograph, Geophysics, vol. 25, no. 1, 95-105.
- CUNNINGHAM, A. B., 1979, Some alternate vibrator signals, Geophysics, vol. 44., no. 12., 1901-1921.
- DELUCHI, L., 1994, Comment on "Simultaneous vibroseis recording" by J. E. Martin and C. W. M. Bacon, Geophysical Prospecting, 42, 521.
- DOBRÓKA, M., 1987. Fejezetek az elméleti fizikából, Tankönyvkiadó, Budapest.
- DZIEWONSKI, A., BLOCH, S. and LANDISMAN, M., 1969, A technique for the analysis of transient seismic signals, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 59, no. 1, 427-444.
- EDELMANN, H., 1966, New filtering methods with "Vibroseis", Geophysical Prospecting, 14, 455-469.
- EDELMANN, H., 1982, A contribution to the investigation of amplitude characteristics of vibrator signals, Geophysical Prospecting, 30, 774-785.
- EDELMANN, H. and WERNER, H., 1982, Combined sweep signals for correlation noise suppression, Geophysical Prospecting, 30, 786-812.
- GABOR, D., 1946, Theory of communication, Journal of the IEE, vol. 93, 429-457.
- GOMBÁR, L., 1991, A vibroszeiz módszer jel/zaj viszony problémái, Egyetemi doktori dolgozat.
- GROSSMANN, A., KRONLAND-MARTINET, R. and MORLET, J., 1989, Reading and understanding continuous wavelet transforms, in Wavelets Time-Frequency Methods and Phase Space, Springer-Verlag, 2-20.
- KODERA, K., VILLEDARY, C. and GENDRIN, R., 1976, A new method for the numerical analysis of non-stationary signals, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 12, 142-150.
- LANDISMAN, M., DZIEWONSKI, A. and SATO, Y., 1969, Recent improvements in the analysis of surface wave observations, Geophysical J. R. A. S.
- LERWILL, W. E., 1981, The amplitude and phase response of a seismic vibrator, Geophysical Prospecting, 29, 503-528.
- LI, X.-P., 1995a, Monitoring harmonic distortion in vibroseis data by a pure phase shift filter, EAGE 57<sup>th</sup> Conference and Technical Exibition, Glasgow.
- LI, X.-P., 1995b, Elimination of harmonic distortion in vibroseis data, Geophysics, vol. 60, no. 2, 503-516.
- LI, X.-P., 1997a, Decomposition of vibroseis data by the multiple filter technique, Geophysics, vol. 62, no. 3, 980-991.

- LI, X.-P., 1997b, Elimination of higher modes in dispersive in-seam multimode Love waves, Geophysical Prospecting, 45, 945-961.
- LI, X.-P., 1997c, Elimination of ghost noise in vibroseis data by deconvolution, Geophysical Prospecting, 45, 909-929.
- MARTIN, J. E. and WHITE, R. E., 1989, Two methods for continuous monitoring of harmonic distortion in vibroseis signals, Geophysical Prospecting, 37, 851-872.
- MARTIN, J. E., 1993, Simultaneaous vibroseis recording, Geophysical Prospecting, 41, 943-967.
- MORLET, J., ARENS, G., FOURGEAU, E. and GIARD, D., 1982, Wave propagation and sampling theory Part II: Sampling theory and complex waves, Geophysics, vol. 47, no. 2, 222-236.
- OKAYA, D. A., KARAGEORGI, E. K., McEVILLY, T. V. and MALIN, P. E., 1992, Removing vibrator-induced correlation artifacts by filtering in frequency-uncorrelated time space, Geophysics, vol. 57, no. 7, 916-926.
- PRITCHETT, W. C., 1991, An example of simultaneous recording where necessary signal separation is easily achieved, Geophysics, vol. 56, no. 1, 9-17.
- QIN, S. and SMYTHE, D. K., 1998, Filtering vibroseis data in the precorrelation domain, Geophysical Prospecting, 46, 303-322.
- RIETSCH, E., 1977, Computerized analysis of vibroseis signal similarity, Geophysical Prospecting, 25, 541-552.
- RIETSCH, E., 1981, Reduction of harmonic distortion in vibratory source records, Geophysical Prospecting, 29, 178-188.
- RIOUL, O. and VETTERLI, M, 1991, Wavelets and signal processing, IEEE SP MAGAZINE, 14-38.
- SALLAS, J. J. and WEBER, R. M., 1982, Comments on "The Amplitude and phase of a seismic vibrator" by W. E. Lerwill, Geophysical Prospecting, 30, 935-938.
- SALLAS, J. J., 1984, Seismic vibrator control and the downgoing P-wave, Geophysics, vol. 49, no. 6, 732-740.
- SCHEUER, T. E. and OLDENBURG, D. W., 1988, Local phase velocity from complex seismic data, Geophysics, vol. 53, 1503-1511.
- SCHOLTZ, P., 1995, Szeizmikus jelek vizsgálata kevésbé ismert attribútumok segítségével, Magyar Geofizikusok Egyesülete Vándorgyűlése, Kőszeg.
- SCHOLTZ, P., 1996a, Diszperz szeizmikus jelek analízise wavelet transzformáció segítségével, Ifjú Szakemberek Ankétja, Balatonvilágos.
- SCHOLTZ, P., 1996b, A wavelet transzformáció alkalmazása szeizmikus jelek frekvencia analízisére, Magyar Geofizikusok Egyesülete és a Magyarhoni Földtani Társulat közös Vándorgyűlése, Kerekegyháza.
- SCHOLTZ, P., 1997a, Újabb szeizmikus attribútumok értelmezése, OTKA F 014492, Zárójelentés.
- SCHOLTZ, P. and GILI, L.,1997b, Dispersion analysis by wavelet transform tailored for the data, 59<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, P001, Geneva.

- SCHOLTZ, P., 1997c, Group traveltime estimation by wavelet transform with linear chirp as the basic wavelet, Geophysical Transactions, 40, 145-153.
- SCHOLTZ, P., 2000, Összetett geofon jel szétválasztásán alapuló szeizmikus mérési és feldolgozási módszer, Magyar Geofizikusok Egyesülete és a Magyarhoni Földtani Társulat közös Vándorgyűlése, Szolnok.
- SCHOLTZ, P., 2001, Szintetikus és terepi példák a wavelet transzformáción alapuló diszperzió analízisre, az ÁDÁM, O., Felszíni szeizmikus zavarhullámok II., T 026415 OTKA jelentésben, 8-20.
- SCHOLTZ, P., 2002a, Geofizikai módszerfejlesztés: Szeizmikus feldolgozás, ELGI Jelentés.
- SCHOLTZ, P., 2002b, Amplitude analysis of harmonics on vibrator generated direct waves, 64<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, P083, Florence.
- SCHOLTZ, P., 2003a, Improved seismic data analysis tool in hydrogeophysical applications, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France.
- SCHOLTZ, P., 2003b, Constructing an output signal estimate of a vibratory source, 65<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, P233, Stavanger.
- SCHOLTZ, P., 2003c, A vibrátor tényleges erőhatásának rögzítése által lehetővé tett mérési, feldolgozási módszerek vizsgálata, Nemzetközi Geofizikai-Földtani-Fluidumbányászati-Környezetvédelmi Vándorgyűlés/Konferencia és Kiállítás, Szolnok.
- SCHOLTZ, P., 2003d, A vibrátor valódi jelének vizsgálata, Magyar Geofizika (folyamatban).
- SCHRODT, J. K., 1987, Techniques for improving Vibroseis data, Geophysics, vol. 52, no. 4, 469-482.
- SERIFF, A. J. and KIM, W. H., 1970, The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources, Geophysics, vol. 35, no. 2, 234-246.
- SHENSA, M. J., 1992, The discrete wavelet transform: wedding the a trous and mallat algorithms, IEEE Transactions on Signal Processing, 40, 2464-2482.
- SORKIN, S. A., 1974, Sweep signal seismic exploration, United States Patent, no. 3786409.
- STEINER, F. 1990. A geostatisztika alapjai, Tankönyvkiadó, Budapest.
- TAKÁCS, E., 1980. Geofizikai adatfeldolgozás, I. rész, Tankönyvkiadó, Budapest.
- VAN DER VEEN, M., BROUWER, J. and HELBIG, K., 1999, Weighted sum method for calculating ground force: an evaluation by using a portable vibrator system, Geophysical Prospecting, 47, 251-267.
- WALKER, D., 1995, Harmonic resonance structure and chaotic dynamics in the earthvibrator system, Geophysical Prospecting, 43, 487-507.
- WERNER, H. and KREY, TH., 1979, Combisweep A contribution to sweep techniques, Geophysical Prospecting, 27, 78-105.
- WILKINSON, K. HABIAK, R., SIEWERT, A. and MILLINGTON, G., 1998, Seismic data acquisition and processing using measured motion signals on vibrators, 1998 SEG Expanded Abstracts.
- ZHUKOV, A. P., SHNEERSON, M. B. and MITCHELL, K. L., 1994, Some aspects of signal excitation, recording, and data processing in vibrational seismic profiling, 1994 SEG Expanded Abstracts.