

Szeizmikus észlelő rendszerek tervezése

TÓTH LÁSZLÓ* – MÓNUS PÉTER* – ZSÍROS TIBOR*

A szeizmikus mérőrendszerek, csoportos geofon rendszerek a modern szeizmológia és szeizmika fontos eszközei. A dolgozat segítséget kíván nyújtani az ilyen csoportos érzékelők geometriájának tervezéséhez. Az ismertetett eljárás a geometriai elrendezésből adódó elméleti átviteli függvény tervezése helyett a jel és a zaj statisztikai tulajdonságainak ismeretében az elérhető jel/zaj arány alapján optimalizálja az elrendezést. A módszer elsősorban és közvetlenül a szeizmológiában felmerült igényeket elégíti ki, geofon csoportok tervezésére nem tettünk kísérletet.

Важным средством современной сейсмологии и сейсморазведки являются сейсмические системы наблюдения и группирования сейсмоприемников.

Эта работа поможет в планировании групп сейсмоприемников. В описанном способе вместо применения теоретической передаточной функции геометрических схем, расстановки оптимизируются на основании величины отношения сигнал/помеха при известных статистических свойствах сигнала и помехи. Непосредственного и в первую очередь способ отвечает потребностям сейсмологии. Опыты группирования сейсмоприемников не проводились.

The seismic measuring systems, geophone arrays are important tools in the modern seismology and seismics. This paper is intended to give help for design of sensor arrays. The method presented in the paper optimizes the S/N ratio basing on the knowledge of the statistical features of the noise as well as the signal instead the design of the theoretical transfer functions depending on the geometry of the arrays. The method directly meets the demands arising in the seismology, we did not make efforts to design geophone arrays for seismic purposes.

Bevezetés

A szeizmikában már az 1920-as években használtak csoportos geofonokat, melyek segítségével az észleléseknél jel/zaj javulást sikerült elérni. A szeizmológiában a módszer alkalmazása csak később indult meg. Amikor a nukleáris fegyverkísérletek korlátozásáról, illetve betiltásáról folyó tárgyalások kapcsán előtérbe került a szeizmológia, mint az ellenőrzés lehetséges eszköze, az egész tudományág gyors fejlődésbe lendült.

Az 1958-as genfi tárgyalások után 1960–63-ban az Amerikai Egyesült Államokban és Angliában kísérleti mérőrendszereket (az angolszász irodalomban array) létesítettek, majd a biztató eredmények után az amerikai ARPA (*Advanced Research Projects Agency*) finanszírozásával Montana államban 1965-ben felépítettek egy nagy kiterjedésű szeizmikus mérőrendszert (*LASA*). Mintegy 6 évvel később kezdte meg működését egy hasonló megfigyelőrendszer Norvégiában (*NORSAR*). A 200 km átmérőjű területen elhelyezett és 588 szeizmométerből álló amerikai *LASA*, valamint a 100 km átmérőjű és 198 érzékelőt tartalmazó norvég *NORSAR* azóta is a világ két egyedülálló ilyen jellegű létesítménye. Később – miután megfelelő mennyiségű feldolgozásra váró kísérleti anyag gyűlt össze – a magas üzemeltetési költségek miatt méretüket csökkentették, illetve csak részleges üzemben működtették.

A fejlődés egyik fontos része volt a digitális jelerősítés bevezetése és a hatalmas adatmennyiség kezelését és feldolgozását lehetővé tevő nagy számítógépekkel felszerelt adatközpontok megjelenése. A *NORSAR* központjában például két

* MTA Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézet, Budapest.

IBM-360-as számítógép az on line adatrögzítést, a jelfelismerést, két IBM-370-es gép pedig az off-line adatfeldolgozást végzi (Husebye 1970, Husebye and Bungum 1970).

Időközben az elméleti kutatások is intenzívebbé váltak, habár teljesen új matematikai eljárások kidolgozására nem volt szükség, hiszen az antenna és a radarelméletből lehetőség volt a haladó hullámokat leíró módszerek átvételére, a szeizmikában pedig az idősorok analízise volt viszonylag ismert feladat. E forrásokból táplálkozva az utóbbi években kialakult a szeizmológiának egy új matematikai ága, melyet gyakran kvantitatív szeizmológiának neveznek (Aki and Richards 1980).

Az array koncepció előnyei kezdettől fogva világosak voltak a szakemberek előtt, széles körű elterjedését azonban gátolta nagy számítógép igénye és ennek magas ára. Napjainkban az elektronika fejlődése, a mini-számítógépek megjelenése már lehetővé teszi, hogy mind több országban a hagyományos szeizmológia átadja a helyét egy új, minőségileg más, korszerű digitális szeizmológiának.

Ismeretes, hogy a földrengések és robbantások során felszabadult energia egy része rugalmas hullámok formájában sugárzódik ki, mely a hullámterjedés törvényeinek megfelelően különböző utakon jut el az észlelőhöz, magával hordozva a forrásról és a terjedési közegről szerzett információt. Az észlelés körülményei határozzák meg, hogy a regisztrált jel mennyi hozzáférhető értékes információt, illetve mennyi értéktelen, zavaró összetevőt tartalmaz, másszóval milyen jel/zaj arányt sikerül elérni. A jel és a zaj megítélése természetesen szubjektív, ami az egyik esetben káros zaj, az egy más esetben éppen a vizsgálni kívánt jel lehet. A mérés előtt kell eldöntenünk, hogy mi az aminek a jelenléte kívánatos a felvételen, és mi az ami nem. Például a norvégiai *NORSAR* tervezésénél a teleszeizmikus (10° fölött) események észlelése volt az elsődleges cél. Ennek alapján a szeizmométereket egymástól több km távolságban, egy 8 km átmérőjű kör területén helyezték el. Az ilyen érzékelők közötti távolság oda vezetett, hogy a lokális – néhány száz km távolságban kipattant – rengések korrelálatlanná váltak, a zaj tartományába estek. A rendszer nem alkalmas a közeli események megfigyelésére. Számos hasonló példát hozhatnánk, többek között ilyen feladat az antennák méretezése. Senki sem várja el, hogy egy *URH* sávra készített, nagyon jól működő antennát középhullámon eredménnyel használhat.

Egy szeizmikus array geometriai elrendezésének és az érzékelők számának tervezése meglehetősen bonyolult feladat (Lacoss 1965), főleg néhány szabályos elrendezés viselkedését vizsgálták (Haubrich 1968). A tervezés során az átviteli függvényt igyekeznek optimalizálni, de elengedhetetlen a helyi szeizmikus zaj statisztikai tulajdonságainak ismerete. Az érzékelők száma és geometriai elrendezése mellett fontos tervezési szempont a nagyfokú jelazonosság, amihez homogén, horizontálisan rétegzett geológiai szerkezet kell.

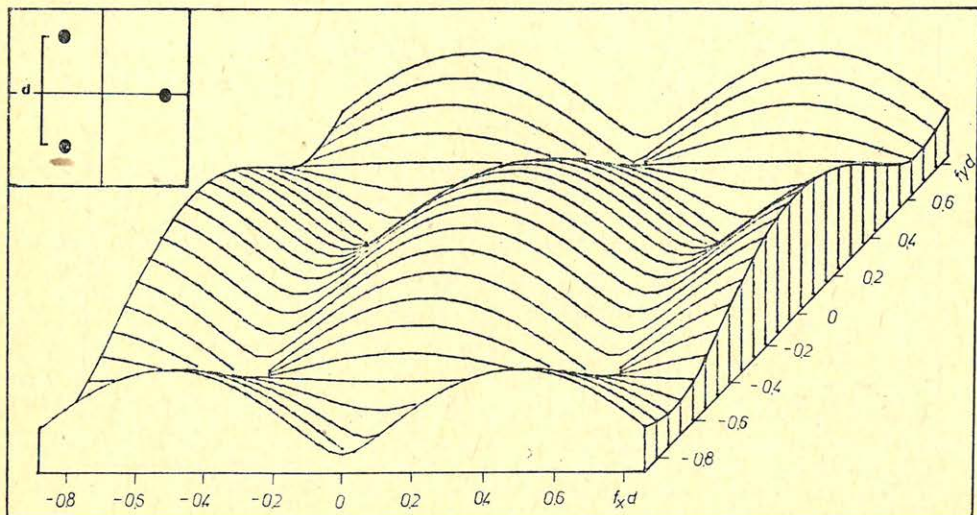
Alapvető követelmények az átviteli függvénnyel kapcsolatban

Legyenek a szeizmométerek az X_1, X_2, \dots, X_L helyen. Ha a kimeneteket összeadjuk, az adott geometria esetén a hullámszám tartományban az átvitel a következő függvénnyel jellemezhető (Meskó 1977):

$$B(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L e^{-jkX_i},$$

ahol k a hullámszám vektor.

A $B(k)$ függvény (a továbbiakban átviteli függvény) lényegében egy diszkrét Fourier-transzformáció a tértartományban. Világos, hogy e függvény mennyire meghatározó szerepet játszik az adatfeldolgozás során. Optimális esetben az átviteli függvény keskeny, meredek lefutású főmaximummal rendelkezik, a mellékmaximumok pedig ehhez képest kicsik. Minthogy $B(k)$ mindenképpen periódikus (Meskó 1977, Bath 1974), szükséges, hogy a periódusa elég nagy legyen. A rendszer mérete határozza meg az átviteli függvény főmaximumának szélességét. Pl. 0.01 km^{-1} szélességű csúcs eléréséhez legalább 100 km -es



GEO 84/15-1

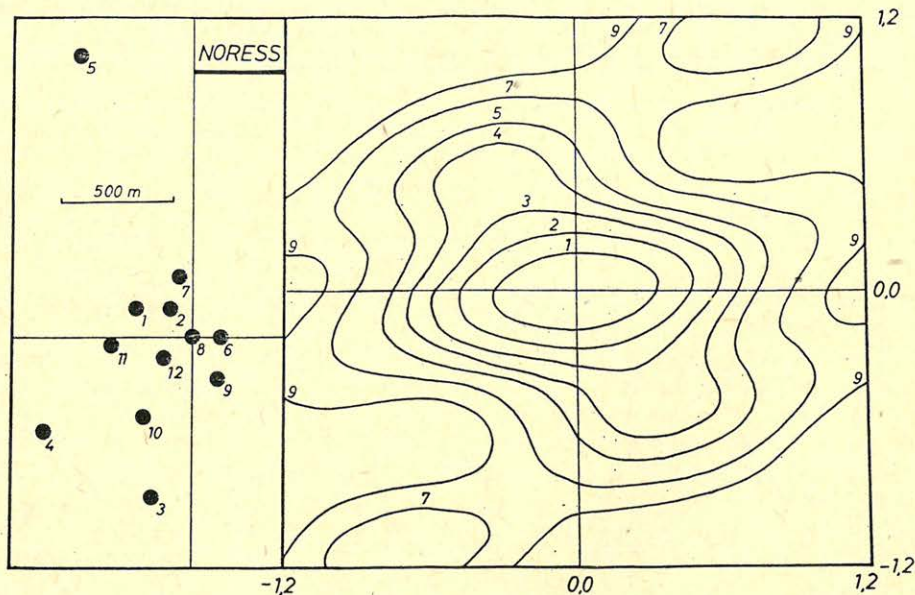
1. ábra. Háromelemű, szabályos háromszög alakú szeizmométer csoport átviteli függvényének abszolút értéke direkt összegezésre

Рис. 1. Абсолютное значение передаточной функции состоящей из трех элементов расстановки сейсмоприемников, форма которой правильный треугольник

Fig. 1. The absolute value of the transfer function of a triangle shaped seismograph pattern consisting of three elements for direct stacking

kiterjedés kell. A szeizmométerek számát számos egymásnak ellentmondó kívánalom alapján lehet megadni. Több érzékelővel a mellékmaximumokat jobban le lehet csökkenteni, ellenben ez megnöveli az építési költséget és a feldolgozás bonyolultabbá válik. A tapasztalat azt mutatja, hogy az érzékelők távolságának és számának meghatározásánál a döntő szempont az aliasing minimalizálása kell hogy legyen. Ismeretes, hogy egy folytonos függvény térbeni mintavételezése hullámszám aliasinghoz vezet, mert az átviteli függvény periódikussá válik. Egyenközű mintavételezés esetén a periódus $1/\Delta X$, ahol ΔX a mintavételi távolság. Ekkor a legnagyobb torzítatlanul átvihető hullámszám $k_N = 1/2 \Delta X$; például $\Delta X = 10 \text{ km}$ esetén $k_N = 0,05 \text{ km}^{-1}$. Ez nagyon alacsony érték, hiszen a P hullám látszólagos sebessége 8 km/s , vagy nagyobb, ami 1 Hz -en megfelel $k \leq 0,13 \text{ km}^{-1}$ -nek. Ez azt jelenti, hogy 10 km távolságban elhelyezett szeizmométerekkel a P energia nagy része az aliasing tartományba esik. Az ilyen torzulások elkerülésére 1 km -nél nem nagyobb szenzortávolság kell.

Olcsóbb és elegánsabb módja az aliasing csökkentésének, a nagy mellékmaximumok elkerülésének a szabálytalan pontokban történő észlelés. Természetesen az átviteli függvény ekkor is periódikus lesz, de a periódus könnyebben megnövelhető. Ilyen rendszert tervezni azonban nem könnyű, a 2. ábrán látható NORESS több éves kísérletezés eredménye (Mykkeltveit and Ringdal 1981).



GEO 84/15-2

2. ábra. A norvégiai NORESS átviteli függvényének abszolút értéke. A szintvonalak a csúcs alatti értéket mutatják dB-ben

Рис. 2. Абсолютное значение норвежской NORESS передаточной функции. Изолинии показывают значение в децибеллах под пиком

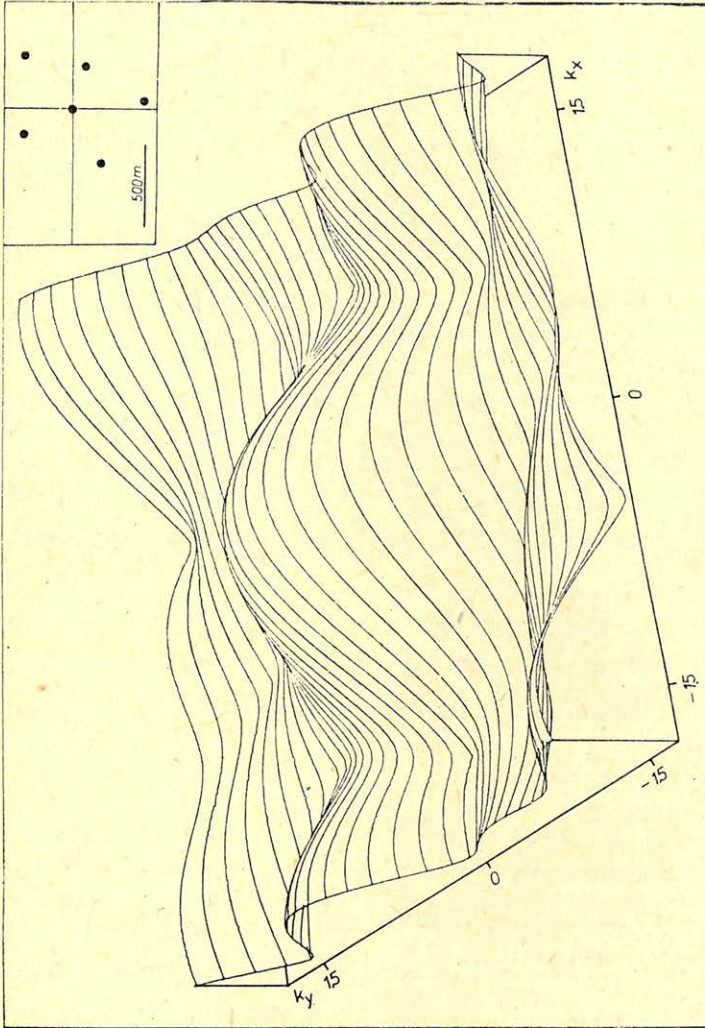
Fig. 2. The absolute value of the transfer function of the Norwegian NORESS. The isolines show the values below the peak in dB scale

Néhány geometriai elrendezés átviteli függvényének abszolút értékét mutatja az 1-3. ábra.

A szeizmikus jel és zaj statisztikai tulajdonságai

A jel és a zaj statisztikai tulajdonságaira tett feltevések érvényességén múlik, hogy milyen jel/zaj javulást tudunk elérni. A jelenleg működő nagy array-k tervezésénél főleg elméleti megfontolásokra támaszkodtak, mivel megfelelő mérési anyag nem állt rendelkezésre. Ez azt eredményezte, hogy az elméleti \sqrt{N} -szeres, (ahol N az érzékelők száma) 10 dB jel/zaj növekedés helyett 3-5 dB-t kaptak.

Ebből a megközelítésből vizsgálva olyan távolságra kell elhelyezkedni a szeizmométereknek, hogy ez a távolság a jel maximális, illetve a zaj minimális korrelációjának feleljen meg.



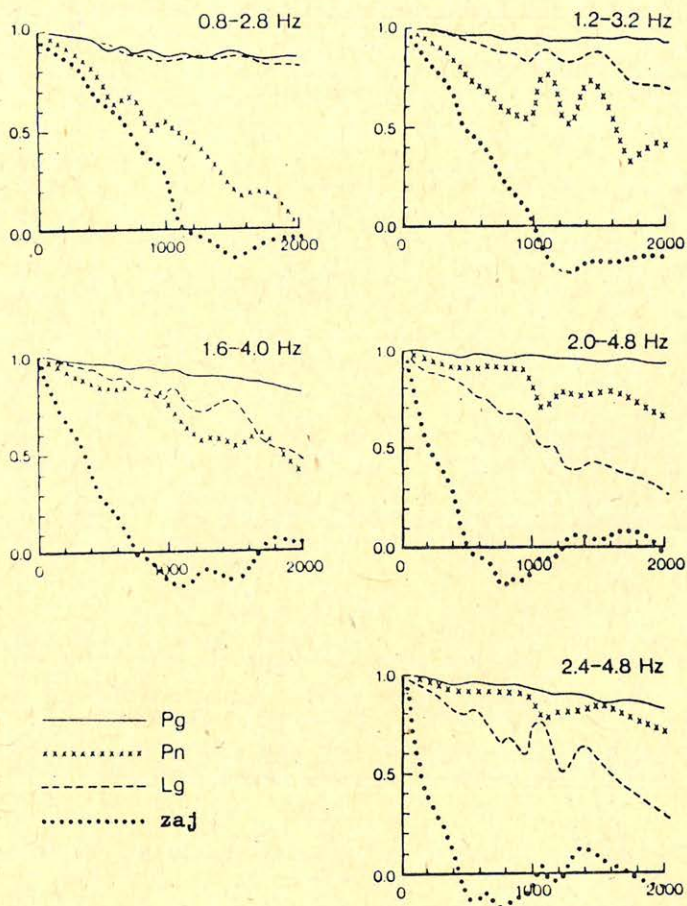
GEO 84/15 - 3

3. ábra. A tervezett újkígyósi mini-array átviteli függvényének abszolút értéke

Рис. 3. Абсолютное значение передающей функции уйкідешской расстановки

Fig. 3. The absolute value of the transfer function of a mini array planned in Újkígyos

Korrelációs vizsgálatot végeztünk a 12 csatornás NORESS adataiból. A rendelkezésre álló szeizmogramok 100 Hz-en voltak mintavételezve. A jel korrelációt a P_g , P_n és L_g fázisokra számoltuk. Fázisonként 2 s-ot (200 adat) vizsgáltunk; a 12 csatorna 66 kereszt-korrelációt szolgáltat 120 – 1950 m távolság tartományban. A korreláció értékeit 100 m-es távolságokra egyenközűvé interpoláltuk, a eredmény a 4. ábrán látható.



GEO 84/15-4

4. ábra. Keresztkorreláció a távolság (méter) függvényében különböző hullámokra, különböző frekvencia intervallumokban

Рис. 4. Взаимокорреляция различных волн в зависимости от расстояния в различных интервалах частот

Fig. 4. Cross-correlations as the functions of the distance for different waves in different frequency intervals

A távolság függvényében történő ábrázolás impliciten tartalmazza a kör-szimmetria feltételezését. Rövid időt tekintve a jel és a zaj lehet anizotróp, de az általunk használt 2 s-os átlag esetén az izotrópia mindenképpen fennáll.

A 4. ábrán látható, hogy a P_g fázisnak minden frekvencián nagy a korrelációja, az L_g pedig magasabb frekvenciákon meglehetősen gyengén korrelál. A P_n korrelációja növekszik a frekvenciával a 4 Hz körüli spektrális csúcshoz megközelítve. Ami a zaj korrelációját illeti, a legszembetűnőbb az, hogy a görbén egy negatív minimum van, s csak ezután tart a nullához. A minimum a 0,6–3,0 Hz tartományban 3–4 km/s sebességgel haladó Rayleigh, illetve 6 km/s sebességű 1 Hz körüli térhullám terjedésre utal, ami a zaj haladó részét jelenti (*Mykkeltveit et. al. 1982*).

A szeizmométerek geometriai elrendezésének optimalizálása

Jellemezzük a jel/zaj arányt a következő értékkel:

$$G^2 = \frac{\sum_{i,j=1}^L W_i W_j R_{ij}^S}{\sum_{i,j=1}^L W_i W_j R_{ij}^N},$$

ahol R_{ij}^S a jel, R_{ij}^N a zaj keresztkorrelációja az i -edik és j -edik szeizmométer között, W_i súlytényezők. A leggyakrabban használt direkt összegzés esetén $W_i = 1$, $i = 1, 2, \dots, L$.

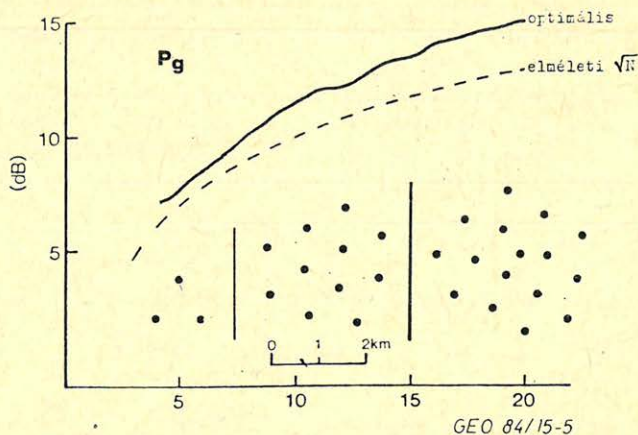
Előfordul, hogy a direkt összegzés helyett célszerű súlyozott összegzést alkalmazni (*Christofferson and Husebye 1972*). Ilyen súlyozással lehet kompenzálni a rossz geometriai elrendezésből adódó hibákat. Megfordítva: optimális konfiguráció esetén a súlyok értéke közel egy lesz.

Mivel $R_{ii}^S = R_{ii}^N = 1$, a fenti összefüggés egyszerűbb alakban:

$$G^2 = \frac{1 + (L-1) \bar{R}_S}{1 + (L-1) \bar{R}_N},$$

ahol \bar{R}_S és \bar{R}_N az átlagos jel és zaj korreláció, ha az érzékelők száma L .

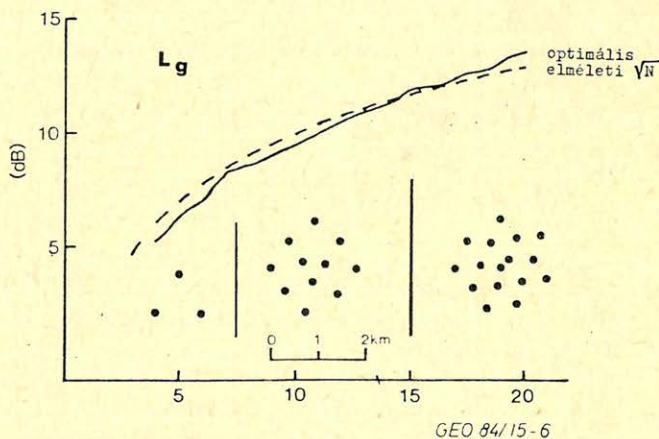
Az optimalizáció lényegében a G^2 függvény maximalizálása az érzékelők koordinátái szerint. A maximum kereséséhez a 4. ábra korrelációs függvényeinek analitikus közelítéseit használjuk. N szenzor esetén az optimális geometriát az $N-1$ esetre optimalizált elrendezés felhasználásával számoljuk úgy, hogy a hozzátett pontot mozgatjuk addig, míg G^2 értéke maximális lesz (*Fletcher and Powell 1965*). A kiindulási konfiguráció egy szabályos háromszög, melynek az oldalhossza a zaj korrelációs minimumához tartozó távolság. Amint az várható, az optimális elrendezést a továbbiakban is erősen meghatározza a zaj korrelációs minimuma, de kevésbé korreláló fázisra (L_g) a jel korrelációs görbéje is fontossá válik. Minthogy ezen tulajdonságok frekvencia függőek, különböző frekvencia intervallumban más-más geometriát kapunk. A frekvencia szerint átlagolt eredményeket 3–20 szeizmométer esetén az 5. és 6. ábrák mutatják a P_g illetve L_g fázisra. Míg L_g esetén a jel/zaj arány az elméleti \sqrt{N} körül van, P_g -re ez az érték szisztematikusan magasabb. Megjegyzendő, hogy a \sqrt{N} -szeres javulás azonos jel és korrelálatlan zaj feltevésén alapul.



5. ábra. Az optimalizált geometriájú rendszerrel elérhető jel/zaj arány az érzékelők számának függvényében P_g hullámra

Рис. 5. Отношение сигнал/помеха достигаемое оптимизированной расстановкой в зависимости от количества сейсмоприемников для волн P_g

Fig. 5. Achievable S/N ratio as the function of the number of the sensors using arrays of optimized geometry for waves P_g



6. ábra. Az optimalizált geometriájú rendszerrel elérhető jel/zaj arány az érzékelők számának függvényében L_g hullámra

Рис. 6. Отношение сигнал/помеха достигаемое оптимизированной расстановкой в зависимости от количества сейсмоприемников для волн L_g

Fig. 6. Achievable S/N ratio as the function of the number of the sensors using arrays of optimized geometry for waves L_g

A vizsgálat azt mutatja, hogy a P_g detektáláshoz az érzékelők közötti távolság optimálisan a zaj korrelációs minimuma körül van kb. $L < 15$ -ig. Több szenzor esetén a kiterjedés nem növekszik, a legkedvezőbb telepítési hely a közép-

ponti érzékelő környékén van. Ezt azonban elérhetjük súlyozással is úgy, hogy a központi érzékelőnek viszonylag magas súlytényezőt adunk. Tehát az adott jel és zaj feltételek mellett az optimális array 18–20 érzékelőt tartalmaz.

Összefoglalás

Ismerve egy területen a szeizmikus jel és zaj távolság szerinti korrelációját, meg tudunk tervezni egy olyan optimális geometriájú csoportos szeizmográf rendszert, melyben az érzékelők kimeneteit összegezve a jel/zaj javulás a legnagyobb lesz. A módszer rendkívül egyszerű, könnyen alkalmazható bárhol, mindössze a korrelációs függvények ismeretét tételezi fel.

IRODALOM

- Aki K., Richards P. G.*: Quantitative Seismology Theory and Methods I–II., W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
- Bath M.*: Spectral Analysis in Geophysics, Elsevier, 1974.
- Christofferson A., Husebye E. S.*: Least Squares Signal Estimation Techniques in Analysis of Seismic Array P-waves, Geophys. J. R. Astr. Soc., 38: 525–552, 1972.
- Fletcher R., Powell M.*: A rapidly convergent descent method for minimalization, Computer Journal, 6: 163–168, 1965.
- Haubrich R. A.*: Array Design, Bulletin of the Seism. Soc. Amer., 58: 977–991, 1968.
- Husebye E. S.*: The Norwegian Seismic Array, NORSAR Report No. 7, 1970.
- Husebye E. S., Bungum H.*: Seismic Arrays and Data Handling Problems, NORSAR Report 8, 1970.
- Lacoss R. T.*: Geometry and Patterns of Large Aperture Seismic Arrays, M. I. T. Lincoln Lab. Technical Note 1965–64, pp. 83.
- Meskó A.*: Szeizmika I–II. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, 1977.
- Mykkeltveit S., Ringdal F.*: Further development of the NORESS small-aperture array, NORSAR Sc. 1–80/81.
- Mykkeltveit S., et. al.*: Seismic Array Configuration Optimization, NORSAR, Contr. 318, 1982.