

## A HOLOGRÁFIA SZÁMÍTÓGÉPI SZIMULÁCIÓJÁNAK SZEIZMIKUS ALKALMAZÁSA

KISS LAJOS—PINTÉR FERENC

### Bevezetés

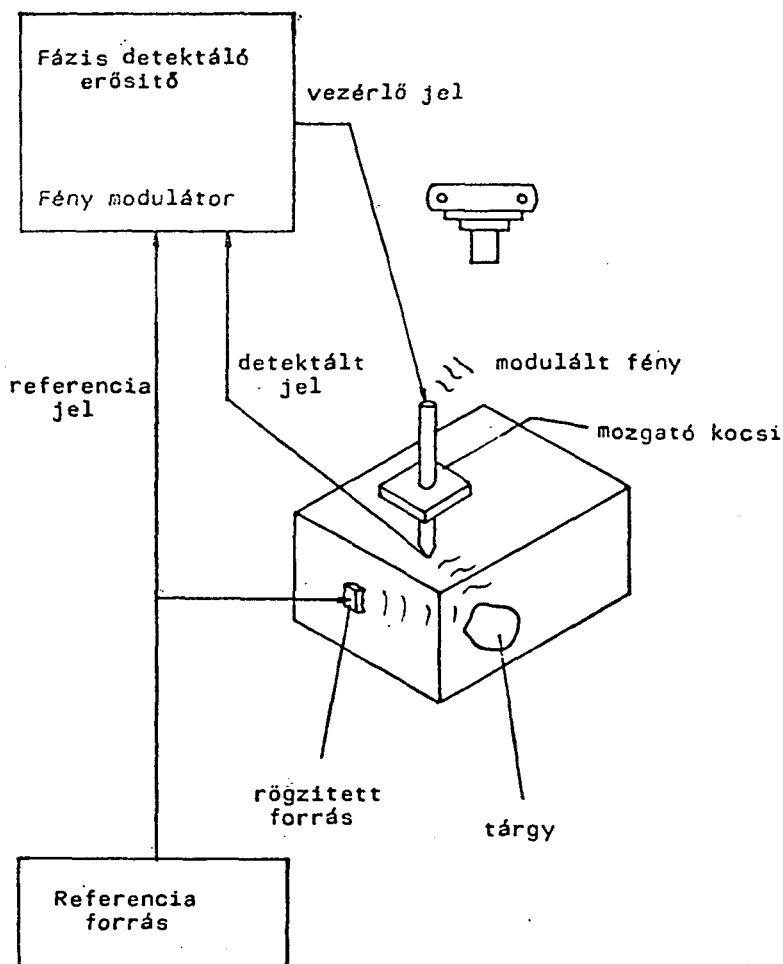
A nyersanyagkutatás leghatékonyabb felszíni geofizikai módszere a szeizmika, mind tudományos, mind alkalmazói szférákat tekintve az érdeklődés homlokterébe került. Ez kellőképpen aláhúzza a szeizmikus adatelemző eljárások továbbfejlesztésére, illetőleg az eljárások körének bővítésére irányuló kutatások fontosságát. A témával kapcsolatban az utóbbi időben megnövekedett figyelem, a holográfia széleskörű alkalmazása az optikában [1], valamint az akusztikai holográfia sikerei az ipari anyagok roncsolásmentes vizsgálata terén [2] hívták életre azt a gondolatot, hogy meg kellene próbálni a szeizmikus mérési adatok holográfiára alapozott kiértékelésével.

A szeizmika szokásos módszereinek valamelyikével, például robbantással vagy úgynevezett vibroszeizmikus eljárással létrehozott szeizmikus teret a föld felszínén alkalmasan elhelyezett detektorokkal regisztráljuk, majd meghatározzuk a szeizmikus hullám spektrumát és kiválasztjuk a megfelelő monokromatikus hullámösszetevőt. Ez a monokromatikus hullámkomponens információt tartalmaz a talaj inhomogén szerkezetére vonatkozóan. Az információ a hullám komplex amplitúdójába van kódolva. A holográfia képalkotó folyamatának számítógépi szimulálásával ezt az információt mintegy dekódoljuk és előállítjuk a vizsgált inhomogén struktúra valódi képét megadó függvényt.

### A holográfia rövid áttekintése

A holográfiát, azaz a hullámfrontok interferometrikus rögzítésének és későbbi visszaállításának a módszerét Gábor Dénes fedezte fel [3]. Eredetileg módszerével az elektronmikroszkópok felbontóképességét kívánta tökéletesíteni. Közvetlenül a holográfia felfedezését megelőző években az elektronmikroszkóp objektívek felbontóképessége 1 nm körüli érték volt, és a szferikus aberráció okozta hiba miatt az elméleti határt 0,5 nm-re jósolták. Ennek a problémának a hatására fogalmazódott meg az a gondolat, miszerint miért ne lehetne úgy eljárni, hogy a tárgyon diffraktálódott, de az aberrációs hiba miatt torzított elektronhullámot — amely ha torz formában is, de a tárgy képét meghatározó valamennyi információt tartalmazza — a koherens háttérrel interferáltatva fotografikus emulzióban rögzítjük, majd a kapott interferenciaképet fényhullámmal átvilágítva és a mintán diffraktálódó hullámot optikai úton korrigálva, létrehozuk az eredeti tárgy képét már torzításmentesen szolgáltató fényhullámot. Annak a kísérleti igazolására, hogy a hologram átvilágításával tényleg a tárgyon diffraktálódott eredeti hullámmal ekvivalens hullámot kaphatunk, Gábor Dénes elkészítette az első hologramot, elektronhullámok helyett fényhul-

lámokkal. Ennek a kísérletnek a nyomán megszületett az optikai holográfia, amely a laser felfedezése, valamint Leith és Upatnicks témához tartozó első eredményei [4] óta az optika dinamikusan fejlődő és a gyakorlatban igen sokat alkalmazott fejezete. Az optikai holográfia sikereinek hatására fejlődött ki a holográfiának egy új ága, az akusztikai holográfia [5]. Az akusztikai holográfiában számos hologramfelvételi módszer ismeretes [6], [7]. A leglényegesebb különbség ezek között a módszerek között az akusztikai tér kimérése során alkalmazott technikában van. Detektorként leginkább a mikrofonok és piezoelektromos érzékelők terjedtek el. Ezek az eszközök közvetlenül az akusztikai hullám pillanatnyi amplitúdóját mérik. Ez lehetővé teszi, hogy alkalmas elektromos referencia jel helyettesítse az akusztikai referencia hullámot. Az akusztikai hologramot pontról pontra kell kialakítani [6], [7]. Ez úgy történik, hogy a detektor alkalmas mechanikus mozgató szerkezet segítségével a hologram felületének valamennyi pontja felett elhalad, azaz letapogatja a hologram teljes felületét. Amint az 1. ábrán látható, a letapogatást végző detektor jele a referencia jellel kerül összekeverésre olyan módon, hogy a tárgy képét meghatározó amplitúdó



1. ábra

és fázis információ vezérlő jelként a fényforráshoz kerül. A fényforrás a vezérlő jel változásainak megfelelően változó intenzitású fényt bocsát ki, miközben a detektorral szinkronban mozog a letapogatásra kijelölt felület felett. Így a fényforrás fényének intenzitását, mint a fényforrás helyzetének a függvényét, fényképezőlemezen rögzíteni lehet. Előhívás után ez a film szolgál hologramként. A hologramot koherens fényvel megfelelően átvilágítva az akusztikai tárgy hullámnak megfelelő optikai hullámhoz jutunk, azaz a tárgy vizuálisan megfigyelhetővé válik. Az általunk vizsgált szeizmikus esetben a tárgy hullám szeizmikus hullám, a hologram diszkrét matematikai operátor, a vizsgálat föld alatti térrészt jellemző rekonstruált hullám pedig a hologram felhasználásával a holografikus hullámfront rekonstrukció számítógépi szimulálása útján származtatható.

### A módszer elmélete Szeizmikus mérések

A szeizmikus kísérletek első lépése a szeizmikus hullámkeltés, amely a szokásos robbantásos és egyéb hagyományos lehetőségen túl, újabban igen sokszor úgynevezett vibroszeizmikus módszerrel történik. Ennek során a szeizmikus hullámot egy változó körfrekvenciával forgatott tengelyhez excentrikusan rögzített tárcsa ütése hozza létre. A szeizmikus hullámok detektálása a felszínen elhelyezett szeizmometerekkel, az úgynevezett geofonokkal történik. A szeizmometerek, típusuktól függően, a mérési pont pillanatnyi elmozdulásával, sebességével vagy gyorsulásával arányos feszültséget hoznak létre. A szeizmometerek kimenetén megjelenő pillanatnyi feszültséget felerősítik, majd a jeleket a regisztráló egységek rögzítik. A szeizmometert a hozzá csatlakozó erősítővel és regisztrálóval együtt szeizmikus csatornának szokás nevezni. A szokásos terepi mérések lebonyolítása vonalban, láncszerűen telepített szeizmikus csatornák alkalmazásával történik. Az egyes csatornák által rögzített jelek, a szeizmogramok vagy szeizmikus regisztrátumok, eljárásunk alapvető kiinduló információi. A számolásokhoz, a szokásosnál bővebb, síkbeli rácsszerű szeizmometér elrendezést tételezünk fel, és ez a szeizmometér rács definiálja Descartes-féle vonatkoztatási rendszerünk  $x, y$  síkját. A  $z$  tengely függőlegesen felfelé mutat.

### A monokromatikus tárgy hullám

A  $j$ -dik geofon által detektált szeizmikus zavart jelöljük  $g(\bar{s}_j, t)$ -vel, ahol  $\bar{s}_j$ , az említett geofon helyzetét megadó vektor és  $t$  az idő. A  $g(\bar{s}_j, t)$  hullámot fogjuk fel infinitezimális monokromatikus hullámok összegeként, azaz

$$g(\bar{s}_j, t) = \int G(\bar{s}_j, f) \exp(2\pi i f t) df,$$

ahol  $f$  a frekvencia. A mérési procedúra által megengedett legnagyobb frekvenciát jelölje  $F$ . A  $g(\bar{s}_j, t)$  függvény tehát sávkorlátos, azaz a mintavételi tétel szerint diszkrétizálva a következő szeizmikus regisztrátummal egyenértékű adathalmazhoz jutunk:

$$g(\bar{s}_j, m\Delta t) = g\left(\bar{s}_j, \frac{m}{2F}\right),$$

ahol figyelembe vettük, hogy a mintavételi tételből származó időlépték

$$\Delta t = \frac{1}{2F}.$$

Tegyük fel, hogy a  $g(\bar{s}_j, t)$  függvény nemcsak sávkorlátos, hanem időhatárolt is a következő intervallumra  $0 \leq t \leq T$ . Ez a feltevésünk nem teljesen korrekt, hiszen sávkorlátos függvény nem lehet időhatárolt is és így a számolások során némi hibát követünk el. Ez a hiba azonban, ha  $FT \gg 1$  és ez szeizmikus regisztrátumok esetében mindig teljesül, a számolási hiba elhanyagolható. Ekkor

$$f = \frac{n}{2F},$$

ahol  $n \leq 2FT$  és  $n$  egész szám. A  $G(\bar{s}_j, f)$  a  $g(\bar{s}_j, m\Delta t)$  szeizmikus adathalmaz diszkrét — Fourier transzformáltjaként írható fel, azaz

$$G\left(\bar{s}_j, \frac{n}{2T}\right) = \frac{1}{2F} \sum_{m=0}^M g\left(\bar{s}_j, \frac{m}{2F}\right) \exp\left(\pi i \frac{mn}{2FT}\right),$$

ahol  $M$  a  $j$ -edik geofon által detektált  $g(\bar{s}_j, t)$  időhatárolt szeizmikus regisztrátumból vett minták teljes száma. Az így meghatározott  $G\left(\bar{s}_j, \frac{n}{2T}\right)$  adathalmaz, rögzített  $n$  értékhez tartozó részhalmaza szolgál a vizsgált föld alatti térrész geofon pozícióként mintavételezett monokromatikus tárgy hullámának komplex amplitúdójaként.

### Szintetikus hologram

A holográfia további modellezése érdekében definiáljunk egy olyan fiktív közeget, az úgynevezett referencia közeget, amelyről feltételezzük, hogy szimulált hullámaink terjesztő közege. A referencia közegtől megköveteljük, hogy legyen végtelen, homogén, izotrop és lineáris valamennyi a későbbiekben felhasználandó fizikai paraméterünk tekintetében. A referenciahullám legyen a referencia közegre vonatkoztatott hullámegyenlet gömbhullám megoldása. Ekkor a  $j$ -edik geofon helyén a referenciahullám komplex amplitúdója  $V(\bar{s}_j)$  az alábbi módon adható meg:

$$V(\bar{s}_j) = \frac{B}{|\bar{s}_j - \bar{q}|} \exp\left(-i \frac{2\pi f}{v} |\bar{s}_j - \bar{q}|\right),$$

ahol  $B$  konstans,  $\bar{q}$  a referencia forrás helyzetét megadó vektor,  $v$  pedig a hullám terjedési sebessége a referencia közegben. A referenciahullámot hozzáadva az előző szakaszban megkonstruált fiktív szeizmikus tárgy hullámhoz, a geofonokkal kijelölt pozíciókban egy szimulált interferencia térhez jutunk. Az interferenciamező intenzitásának alkalmas része,  $P_{\mp}(\bar{s}_j)$  szolgál szintetikus hologramként a holografikus rekonstrukciós folyamat tekintetében a következők szerint:

$$P_{\mp}(\bar{s}_j) = \frac{BA(\bar{s}_j)}{|\bar{s}_j - \bar{q}|} \exp\left(\pm i(\alpha(\bar{s}_j) - \frac{2\pi f}{v} |\bar{s}_j - \bar{q}|)\right),$$

ahol

$$A(\bar{s}_j) = |G(\bar{s}_j, f)|$$

és

$$\alpha(\bar{s}_j) = \arg G(\bar{s}_j, f)$$

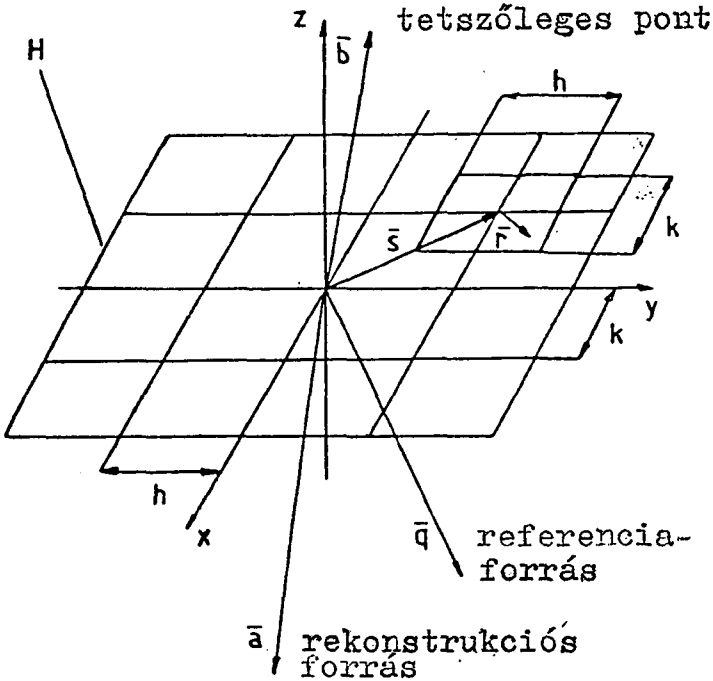
A  $P_{-}(\bar{s}_j)$  operátor használható valós képek,  $P_{+}(\bar{s}_j)$  pedig a konjugált képek meghatározására.

## Szimulált rekonstrukció

A szimulált holografikus hullámfront rekonstrukció a Kirchhoff-féle diffrakciós elmélet alkalmazásán alapszik. A 2. ábrán definiáljuk a használt mennyiségeket.

A  $W(\vec{r})$  rekonstrukciós hullám legyen a referenciahullámhoz hasonlóan gömbhullám. A frekvenciák azonban nem kell, hogy feltétlenül egyenlők legyenek, azaz a  $W(\vec{r})$  komplex amplitúdó a következő:

$$W(\vec{r}) = \frac{c}{|\vec{r} + \vec{s}_j - \vec{a}|} \exp\left(-i \frac{2\pi w}{v} |\vec{r} + \vec{s}_j - \vec{a}|\right),$$



2. ábra.  $k$  a geofonok közötti távolság  $x$  irányú vetülete,  $h$  a geofonok közötti távolság  $y$  irányú vetülete,  $H$  a geofonrács által lefedett felület,  $\vec{s}_j$  a  $j$ -edik geofon helyzetét megadó vektor,  $D$ , a  $j$ -edik geofon körüli négyzet,  $\vec{r}(x, y)$  a  $D$ , négyzet tetszőleges pontjába mutató vektor.

ahol  $C$  konstans és  $w$  a frekvencia. A diffrakciós elmélet szerint a rekonstruált hullám  $U(\vec{b})$  komplex amplitúdója a következő integrállal állítható elő [8]:

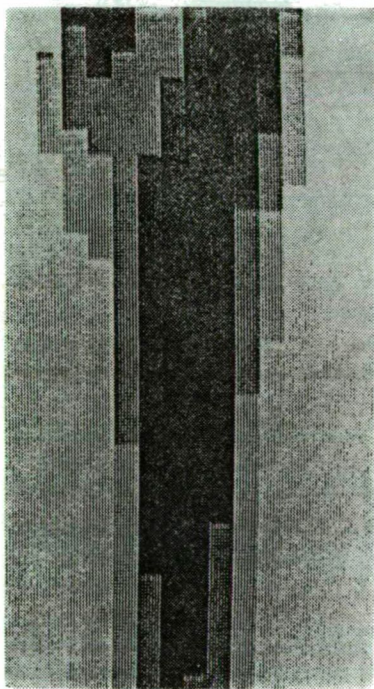
$$U(\vec{b}) = \frac{1}{2\pi} \iint P_+(\vec{r}) W(\vec{r}) \cdot \left( \frac{1}{|\vec{r} + \vec{s}_j - \vec{b}|} + i \frac{2\pi w}{v} \right) \cdot \frac{b_z}{|\vec{r} + \vec{s}_j - \vec{b}|} \exp\left(-i \frac{2\pi w}{v} |\vec{r} + \vec{s}_j - \vec{b}|\right) dx dy.$$

Az előző szakaszban meghatározott  $P_+(\vec{r})$  valamint  $W(\vec{r})$  függvények konkrét alakját az integrál kifejezésbe helyettesítve  $U(\vec{b})$  közvetlenül algoritmizálható közeliítéséhez jutunk [9]. A szokásos képintenzitást ezután az  $U(\vec{b})U^*(\vec{b})$  szorzat kiszámításával határozzuk meg.

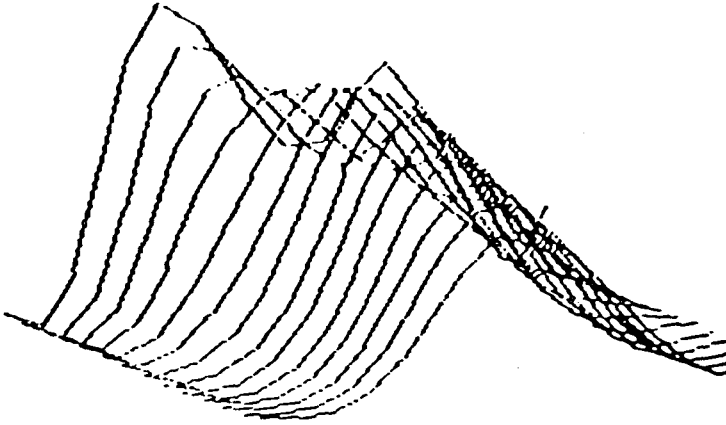
### Alkalmazási tapasztalatok

A 3. fejezetben megadtuk azokat az összefüggéseket, amelyek felhasználásával a szeizmikus regisztrátumok alapján, a talaj inhomogén szerkezetének a képét jellemző függvény tetszőleges pontokban meghatározható. A konkrét számításokat az említett összefüggések alapján elkészített számítógépi programrendszerrel végeztük el. Az eredmények vizuális megjelenítését a rendszer grafikus modulja tette lehetővé.

A geofizikai barnaszén kutatási, feltárási program keretei között nyílt alkalom az előzőekben leírt holografikus módszer kipróbálására. A geofizikai kutatások fő célja a legjelentősebb törések meghatározása volt egy tervezett bányászati fővágat körzetében [10]. A szeizmikus mérések szokásos kiértékelése törések jelenlétét jelezte. Izgalmas kérdésként merült fel ezután, hogy a holografikus eljárás vajon képes-e a törések jelenlétének kimutatására, a törések méreteinek, alakjának esetleges megadására. 120 szeizmikus regisztrátum alapján végeztük az értékelést. Az adatok a legjelentősebbnek detektált törésvonal felett vonalban letelepített szeizmikus csatornacsoportoktól származtak. A feldolgozás eredményei a 3. és a 4. ábrán láthatók, ame-



3. ábra



4. ábra

lyek a normál szeizmikus feldolgozás és a kutatófúrások alapján elvégzett értékelésekkel összhangban vannak.

Ezek az eredmények egyértelműen igazolják a holográfia számítógépi szimulációjára alapozott módszer alkalmazhatóságát geofizikai kutatások során földtani inhomogenitások kimutatására.

#### IRODALOM

- [1] R. I. COLLIER, C. B. BRUCKHARDT, L. H. LIN: Optical Holography, Academic Press, New York. (1971).
- [2] B. P. HILDEBRAND: Holograms, ultrasound computers combined to detect flaws, Industrial Research and Development November, 102—104, (1982)
- [3] D. GABOR: A New Microscopy Principle, Nature 161, 777—778 (1948)
- [4] E. N. LEITH, I. UPATNICKS: Reconstructed wavefronts and communication theory, J. Opt. Soc. Am. 52, 1123—1130 (1962)
- [5] P. GREGUS: Techniques and information content of sonoholograms, I. Phot. Sci. 23, 143—144, (1966)
- [6] E. CAMATINI: Optical and Acoustical Holography, Academic Press, New York, (1972)
- [7] G. WADE: Acoustical Holography Vol. 4., Plenum Press, London, (1972)
- [8] M. BORN, E. WOLF: Principles of Optics, 5th. ed., Pergamon Press, Oxford, (1975)
- [9] L. KISS: Computer Simulation of Holography for Seismic Purposes, Mathematics and Computers in Simulation, 28, 325—330 (1986)
- [10] Annual Report of ELGI of Hungary, (1980—1984)

### DIE RECHNENMASCHINENSIMULATION DER HOLOGRAPHIE ZU SEISMISCHER ANWENDUNG

KISS, LAJOS—PINTÉR, FERENC

In der Arbeit wird das Herangehen an die mathematische Simulation der Holographie behandelt, das für die spezielle Bearbeitung seismischer Daten ein geeignetes Verfahren bedeutet. Das Verfahren wurde als ein Programmsystem mit Rechenmaschine durchgeführt.

Die im Laufe der Anwendung dieses Systems gewonnenen Erfahrungen beweisen, dass die Kombination der Holographie und der Rechnungstechnik — mit Rücksicht auf gewisse seismische experimentale Erfahrungen — für die Darstellung der holographischen Bilder der sich unter der Erde befindenden, durch seismische Wellen „beleuchteten“ inhomogenen Strukturen mit vielversprechenden Erfolgen anzuwenden.

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЛИРОВАНИЯ ГОЛОГРАФИИ НА ЭВМ В СЕЙСМИКЕ

КИШ, ЛАЙОШ—ПИНТЕР, ФЕРЕНЦ

В данной работе мы рассматриваем математическое моделирование голографии, которое представляет собой подходящий метод для специальной обработки сейсмических данных. Этот метод реализован нами в виде набора программ. В ходе применения данной системы программ пришли к заключению, что объединение голографии и вычислительной техники — с учётом специфики сейсмических исследований — можно эффективно применить для определения голографической картины неоднородных подземных структур, «просвеченных» сейсмическими волнами.