



## Kísérleti vizsgálatok a szeizmikus holográfia terén\*

V. D. ZAVJALOV\*\*

A szeizmikus kutatás hatékonyságának fokozása céljából a Szovjetunióban, az USA-ban, Franciaországban és sok más országban elméleti és kísérleti vizsgálatokat végeztek a holográfia elveinek geofizikai alkalmazási lehetőségeivel kapcsolatban.

A dolgozat áttekinti a fejlődésben jelenleg mutatkozó irányzatokat és bemutatja a Szovjetunióban, elsősorban az Ukrán Földtani Tudományos Kutató Intézet (Lvov) szeizmikus holográfiai laboratóriumában végzett munkák eredményeit. A végrehajtott kísérleti vizsgálatok többek között arra a következtetésre vezettek, hogy az optikai eljárásokkal teljesen analóg szeizmikus fotográfiai és holográfiai módszerek csak abban az esetben hozhatók létre, és válhatnak hatékonyvá, ha olyan rugalmas hullámokat sikerül felhasználni a földtani objektumok „átvilágítására”, melyek hossza 100–1000-szer rövidebb ezen objektumok átmérőjénél.

A vizsgálatok alapján előzetes véleményt lehetett alkotni a „színes szeizmikus holográfia” módszerének létrehozási lehetőségéről is, vagyis a képmásoknak a rugalmas hullámok polikromatikus tereiben való regisztrálásáról. Feltehető, hogy a polikromatikus holográfia a közetfizikai tulajdonságok meghatározásának hatékony eszköze lesz.

Befejezésül a szerző válaszolja a közeljövő feladatait a szóban forgó kutatási területen.

С целью повышения эффективности сейсморазведки в СССР, США, Франции и в ряде других стран выполнен ряд теоретических и экспериментальных исследований по проблеме применения в геофизике принципов голографии.

В работе дается обзор современных направлений развития и приводятся результаты работ, выполненных в СССР, прежде всего в лаборатории сейсмической голографии Украинского научно-исследовательского геологоразведочного института (г. Львов). Выполненные экспериментальные исследования позволили, между прочим, сделать вывод в том, что методы сейсмической фотографии и голографии, полностью аналогичные оптическим, могут быть созданы и стать эффективными только при условии, если удастся использовать для „освещения“ геологических объектов упругие волны, длина которых в 100–1000 раз короче поперечника этих объектов.

Исследования позволили высказать предварительные суждения о возможности создания метода „цветной сейсмической голографии, т. е. способа регистрации изображений в полихроматических полях упругих волн. Можно допустить, что полихроматическая голография окажется эффективным средством определения физических свойств горных пород.

В заключение автор перечисляет задачи в близком будущем по данной теме исследований.

\* Elhangzott a 20. Szimpoziumon 1975. szept. 16–19.

\*\* V. D. Zavjalov, VNIIGeofizika Moszkva



*In order to increase the effectivity of seismic prospecting, in the Soviet Union, USA, France and many other countries theoretical and exploratory investigations have been going on in connection with the applicational possibilities of the principle of holography in geophysics.*

*The paper reviews the various trends followed at present within developmental works in the Soviet Union and especially it discusses the results of works made at the Seismical Laboratory for Holography of the Ukrainian Scientific Research Institute for Geology in Lvov. Experimental investigations carried out led — among others — to the statements that seismic photographic and holographical methods being fully analogous to optical procedures can only be developed and can only become effective, if we are able to use for the „transillumination” of geological objects elastic waves of such wave-length that are 100–1000–times shorter than the diameters of these objects.*

*From the investigations one could conclude that there are possibilities for developing of the method of coloured holography too, i. e. the registration of images in the polychromatic fields of elastic waves. One can suppose that the polychromatic holography will become a powerful tool of determination of petrophysical characteristics of rocks.*

*Finally the author deals with the problems of near future on the research domain concerned.*

A szeizmikus kutatás hatékonyságának fokozása céljából a Szovjetunióban, USA-ban, Franciaországban és sok más országban számos elméleti és kísérleti vizsgálatot végeztek a holográfia elveinek geofizikai alkalmazásai lehetőségeivel kapcsolatban.

A holográfia elveit a szeizmikus kutatásban különféle műszaki eszközök segítségével valósítják meg. A Szovjetunióban olyan eljárást dolgoztak ki, mely az ábrázolások fotoösszegezésének hatását használja fel, Franciaországban és az USA-ban analóg feladatokat számítások útján oldanak meg számítógépek segítségével.

Számos olyan találmány van, melyek szerzői azt javasolják, hogy az akusztikus vagy szeizmikus terekre vonatkozó információt az optikai hullámhossztartomány hologramjaivá alakítsák át. Feltételezik, hogy ilyen fajta „szeizmikus hologrammokkal” megkapható a kutatási objektumok képe közvetlenül fényhullámokban.

Jelenleg két irányzat figyelhető meg a szeizmikus holográfia fejlődésében. Az első irányzat szinte egyáltalán nem érinti azokat a műszaki és módszertani alapokat, melyeken a korszerű szeizmikus kutatás alapul. Az ezen irányban végzett munkák célja a kiértékelés pontosságának fokozása, a szokásos terepi szeizmikus felvételek közegábrázolássá való átalakítási folyamatának meggyorsítása és olcsóbbá tétele. A második irányzat a módszer sarkalatos megváltoztatását irányozza elő. Olyan elvileg új műszaki eszközök kidolgozását tűzi ki célul, melyek biztosítják a rétegek „megnézését” vagy „fényképezését” azok rugalmas szeizmikus hullámokkal történő „átvilágítása” útján.

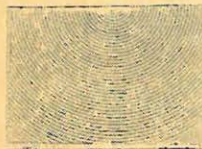
A jelen áttekintésben alapvető figyelmet fordítottunk a szeizmikus holográfia fejlesztésének második irányzatához tartozó kísérleti vizsgálatokra. A vizsgálatokat az Ukrán Földtani Tudományos Kutató Intézet (Lvov) szeizmikus holográfiai laboratóriumában végeztük.

A kísérleti munkák elvégzéséhez a „digitális holográf” laboratóriumi makettjét használtuk fel, mely nem más, mint egy kétkoordinátás asztallal ellátott fényképezeti nagyítógép, melyre fényérzékeny ívet helyeznek. A mikrométeresavarak limbuszokkal vannak ellátva az asztal síkjának az  $X$  és  $Y$  tengelyek mentén való elmozdulásainak pontos leolvasása céljából. A nagyítógép keretébe teszik a tesztet — elemi hullámkép ábrázolást a tér adott metszetében (a mi kísérleteinknél az  $XZ$  síkban), és a nagyítási együttható változtatásával beállítják ezen hullámkép ábrázolásának léptékét. Ezután egymásután exponálják az asztalon levő fotopapírt, minden exponálás előtt eltolva az ívet úgy, hogy az elemi tér középpontjának ábrázolása az  $X$  tengely mentén az észlelési



pont koordinátája felett legyen olyan fáziseltolódással a  $Z$ -tengely mentén, mely megfelel a kísérleti program szerint megadott elméleti értékeknek. A fényérzékeny filmnek vagy papírnak az elemi hullámterek képeivel való ismételt exponálása eredményeképpen a fothordozón az eredő hullámkép rejtett ábrázolása jön létre. A valamilyen közegben ható reális hullámok interferenciás hatásának a fotoösszegezéssel a fényérzékeny réteg megfeketedése felel meg. Az elemi hullámképek azonos fázistengellyel történő szuperponálódása helyein a fényérzékeny réteg megfeketedésének foka nagyobb lesz, mint az ellentétes fázissal végbemenő szuperponálódás helyein. A megvilágított fényérzékeny anyag fotokémiai feldolgozása után létrejön a tér eredő ábrázolása, mely az összes elemi tér „fotoösszegét” képezi.

Az 1. ábrán látható az elemi hullámter ábrázolása, melyet a harmonikus terekkel végzett teljes kísérletsorozat elvégzésére használtunk fel. Ez az ábrázolás koncentrikus félkörök rendszeréből áll, ami megfelel homogén és izotróp közegben ható harmonikus stacionárius rezgések tere pillanatnyi lefényképezésének az  $XZ$  síkban.



1. ábra. Az elemi hullámter tesztje.

Рис. 1. Тест элементарного волнового поля.

Fig. 1. Test of the elementary wave field.



2. ábra. Síkfrontú hullámok a fényérzékeny rétegben: az 1. ábrán bemutatott teszt 80-szoros fotóösszegezéssel kialakított képmása.

Рис. 2. Сформированное на фотослое изображение волн с плоским фронтом путем 80-кратного фотонакопления теста, показанного на рис. 1.

Fig. 2. Image of waves with a plane front formed in the photolayer by 80-fold photoaccumulation of the test shown in Fig. 1.

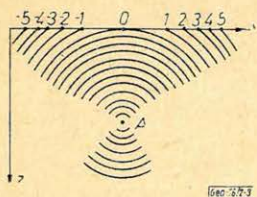
A 2. ábrán látható a sík hullámfrontú térábrázolás képzésének legegyszerűbb példája. Ezt úgy állították elő, hogy a fényérzékeny anyagra 80-szorosan ráexponálták az 1. ábrán bemutatott elemi tér ábrázolását, mikor is a koncentrikus félgyűrűk középpontját mindegyik megvilágításnál szigorúan az  $X$  tengely mentén adott  $\Delta x = 1/2\lambda$  értékkel, vagyis az 1. ábrán látható teszt félkörei közötti intervallum felével elmozdítják. A  $Z$  tengely mentén semmiféle eltolásra nem került sor.

Eredményképpen kialakult egy vízszintes vonalrendszer ábrázolata. Ez a rendszertáblázat megfelel a hullámter pillanatnyi lefényképezésének az  $XZ$  síkban, mely hullámter valódi rugalmas közegben alakulhatott volna ki elemi gömbi hullámterek egyidejű és azonos fázistengellyel történő gerjesztése esetén az  $X$  vonal mentén  $80$  pontban, például váltóáramú hálózatról szinkronizáltan működtetett rugalmas rezgékeltőkkel.

### Monokromatikus hullámok holografikus fókuszálása

Tegyük fel, hogy az  $A$  pontban (3. ábra) van egy harmonikus hullámokat létrehozó rengéskeltő. Valamilyen időpontban az  $X$  tengelyen rögzítsük a hullámter azonos fázisú rezgéseinek, például maximumainak helyzetét, melyeket a





3. ábra. Pontszerű forrás által kisugárzott harmonikus tér holografikus helyreállítási eljárásának elve.

Рис. 3. Принцип голографического способа восстановления гармонического поля, изучаемого точечным источником.

Fig. 3. Principle of the holographic restoring of harmonic field, sirradiated by punctual source.

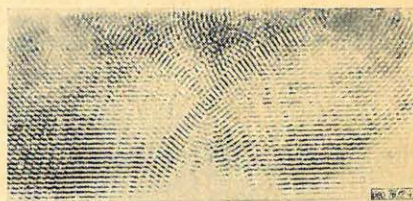
3. ábrán fekete ívekkel jelöltünk az  $A$  pontban levő középponttal. Ha a vizsgált tér hatni tudna a fotografikus lemeze, úgy az  $X$  tengelyen az általunk megjelölt pontoknak a lemezen az emulzió kivilágosodása felelne meg, vagyis lineáris hologramot kapnánk diffrakciós pontokkal. Ahhoz, hogy ennek a hologramnak alapján helyreállíthassuk a kiindulási hullámteret, arra kell „kényszeríteni” mindegyik diffrakciós pontot, hogy sugározza ki adott frekvenciájú elemi terét a rögzített értéknek megfelelő kezdőfázissal. Esetünkben a kezdőfázis valamennyi észlelési pontban egyforma. Eredményként az ezen pontban elhelyezett adók azonos fázistengelyű hatásának dacára ki kell alakulnia a fókuszáló térnek (nem pedig olyan síkfrontnak, mint a 2. ábrán). Első pillantásra ez ellentmondásosnak tűnik – az adók azonos fázisban működnek, a kialakuló hullámteret pedig konvergál az  $A$  pontban, vagyis fókuszálódik. És valóban, ilyen effektus nem jelentkezik, ha az adók által kisugárzott terek nem lesznek monokromatikusak. Ha például az adók egyidejűleg rövid impulzust sugároznak ki, akkor az eredő hullámteret semmiféle fókuszálására nem kerül sor. A fókuszálás csak folyamatos harmonikus sugárzás mellett lehetséges, ha az energia szinusztörvény szerint oszlik szét sugárirányban az egyes elemi adóktól.

A hullámteret lencsés (fotografikus) fókuszálásánál másképp áll a helyzet. Ott a lencse egyforma mértékben „elhajlítja” az összes egymásután következő hullámok frontjait, ezért a fókuszálás effektusa függetlenné válik a rezgések periodicitásától.

4. ábra. Lineáris hologram alapján az ábrázolások fotoösszegezésével helyreállított hullámteret képe.

Рис. 4. Картина восстановленного волнового поля по линейной голограмме методом фотонаколения изображений.

Fig. 4. Picture of a wave field restored from the linear hologram by the method of photoaccumulation of images.



A reális hullámtereket helyettesíthetjük ábrázolásaikkal és az utóbbiak fotoösszegezése útján megkaphatjuk az eredő tér képét. Ilyen képet a 4. ábrán mutatunk be. Ezen világosan látható két hullámteret – az egyik sík vízszintes hullámfrontokkal, a másik fókuszálódó tér, melyen a fókuszálás hatása lényegében a szárnyakon jött létre két egymást metsző sugár formájában, a központi részen pedig „szürke” háttér alakult ki. A tér szerkezetének ez a sajátja könnyen magyarázható azzal, hogy ha az adók a Frenel-gyűrűk törvénye szerint oszlanak meg, azokból a legkevesebb található a Frenel-féle zónalemezt középpontban metsző vonal központi részén, ami jól látható a 3. ábrán.

Másképpen is eljárhatunk.

Helyezzünk el az  $X$  tengely mentén egyenletesen számos elemi hullámot „sugárzó” pontot  $1/2 \lambda$  értékkel és számítsuk ki minden egyes pontra annak az időkeleletésnek értékét, melyet alkalmazni lehetne, ha az  $L$  szakaszra meghatározott felületi görbületségű domború lencsét helyeznénk.



A lencse hatását olyan fáziseltolások bevezetésével imitáltuk, melyek megfelelnek a lencse egyik vagy másik pontján áthaladó hullámok időbeli késésének.

Az 5. ábrán látható a számított (és következésképpen ideális) lencsén keresztülhaladó fókuszáló tér képe, mikor is a lencse előtt a térnek sík frontja volt

5. ábra. Síkhullámok  $80 \lambda$  apertúrájú lencsén áthaladt terének fókuszálási példája (az elemihullámok „generációs” pontjai közötti távolság  $\Delta L = 0,5 \lambda$ ).

Рис. 5. Пример фокусировки поля плоских волн, прошедшего через линзу с апертурой  $80 \lambda$  (интервал между точками „возбуждения” элементарных волн  $\Delta L = 0,5 \lambda$ ).

Fig. 5. Example of focusing the field of plane waves passed through a lens with an aperture of  $80 \lambda$  (interval between the points of „generation” of elementary waves is  $\Delta L = 0,5 \lambda$ ).



az  $X$  tengellyel párhuzamosan. A lencsenyílás mögé menő kiindulási tér egy része az ábra bal oldalán látható. Az 5. ábra megvizsgálásakor „moaré” jelenségét figyelhetjük meg a síknak azon a részén, ahol a szabályos hullámter hiányzik. További vizsgálatok azt mutatták, hogy ez a moaré annál nagyobb, minél ritkábbak az elemi hullámok sugárzási pontjai az  $L$  vonalon, vagyis nagyobb  $\Delta L$  értékek esetén.

Az 5. ábrának a 4. ábrával való összehasonlításakor elkerülhetetlenül felmerül az a következtetés, hogy a lencsés fókuszálás jobb minőségű, mint a holográfikus, ami könnyen magyarázható azzal, hogy a lencsében sokkal több diffrakciós pont van (a mi esetünkben sugárzási pont), mint a hologramon, ahol az egész epicentrális rész gyakorlatilag nem visz információt a kialakítandó térbe. Az optikában, ahol a hullámhosszak nagyon kicsik, a megvilágított tárgyak pedig nagyok, ezt a körülményt el lehet hanyagolni, de a szeizmikában, ahol a tárgyak és a hullámok azonos nagyságrendűek, ez nem hanyagolható el.

Más kísérletek alapján a szeizmikus kutatás szempontjából nagyon fontos következtetést vontunk le: a hullámterek holografikus és fotógrafikus átalakítása ábrázolásokká nem lehet sikeres, ha a teret regisztráló berendezések lencsenyílásai  $40 - 50 \lambda$ -nál kisebbek.

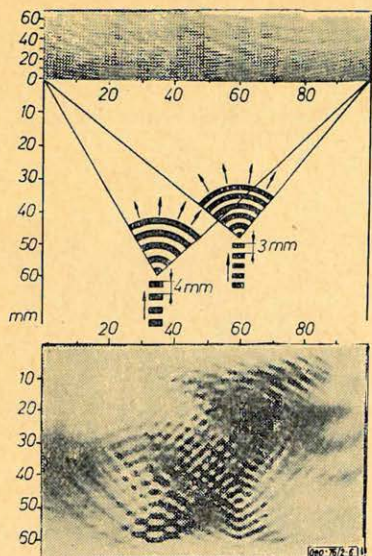
A szeizmikus holográfiában a hullámvételi pontok elég sűrű hálózatát kell alkalmazni, mely kielégíti a  $\Delta L < 1/2 \lambda$  feltételt. Ez a feltétel a terepi munkák megdrágulását és lassulását vonja maga után. Emiatt a szeizmikus hullámterek felvételének új műszaki eszközeit kell felkutatni, melyek nem teszik szükségessé geofonok elhelyezését a vizsgálandó területrészen, vagyis olyan fizikai hatások felhasználásán alapulnak, melyek a föld-levegő réteghatáron jönnek létre szeizmikus hullámok behatása esetén.

### *Terek helyreállítása oszcillografikus felvételeik alapján*

Vizsgáljunk meg néhány kísérletet a terek oszcillografikus felvételek alapján történő helyreállításával kapcsolatban.

Tegyük fel, hogy a sík két pontjában (6. ábra, középen) helyezkednek el a hullámkeltő adók. A baloldali adó  $4 \text{ mm}$  hullámhosszú hullámokat sugároz ki, a jobboldali  $3 \text{ mm}$  hullámhosszal rendelkezőket. A vízszintes észlelési vonalra (felül) helyezzünk hullámvevőket és végezzünk oszcillografikus felvételt a fotó-





6. ábra. A legegyszerűbb hullámtér holografikus eljárással történő helyreállításának példája (felül – a tér oszcillografikus felvétele; középen – a tér adott modellje; alul – a tér helyreállított ábrázolása, mely az elemi tér-ábrázolások fotóösszegezéses módszerével készült).

Рис. 6. Пример восстановления голографическим способом простейшего шумового поля (вверху – осциллографическая запись поля; в середине – заданная модель поля; внизу – восстановленное изображение поля методом фотоаккумуляции изображений элементарных полей).

Fig. 6. Example of restoring the simplest noise field by holographic method (top – oscillographic diagram of the field; centre – given field model; bottom – restored image of the field by the method of photoaccumulation of elementary fields).

szalag megvilágításának változó sűrűségű módszerével. Esetünkben minden egyes észlelési pontba egyidejűleg két, különböző rezgési frekvenciával bíró hullám érkezik be. Szándékosan választottunk olyan hullámhosszakat,

melyek nem nagyon térnek el egymástól – 3 és 4 mm. Ismeretes, hogy ilyen esetekben létrejön a „pulzációs” effektus, vagyis az eredő rezgések fokozatosan növekvő és csillapodó amplitúdói sorozatainak váltakozása. Ha minden egyes oszcillografikus sávot külön vizsgálunk meg (6. ábra, felül), úgy ilyen időbeli váltakozás (függőleges mentén) jól látható. Ha viszont az oszcillogramokat összességükben nézzük meg, azaz az egész  $Xt$  síkot, úgy könnyen észrevehetünk bizonyos korrelációs törvényszerűségeket a hullámsorozatoknak ezen a síkon való elhelyezkedésében. De ha nem kettő, hanem sokkal több sugárzási pontunk lenne, az általuk kisugárzott hullámok pedig erősen eltérnének egymástól a hullámhossz tekintetében, akkor a „pulzációs” effektus az észlelési pontokban nagyon bonyolult jellegűvé válna és az  $Xt$  síkban semmiféle korrelációs törvényszerűségeket nem sikerülne felfedezni. Helyreállítható-e a leírt tér az oszcillografikus felvételek alapján? Igen, helyreállítható. Huygens elvét alkalmazva mindegyik vételi pontot hullámkeltési forrásnak fogjuk tekinteni és ezeken a pontokon pontosan ugyanolyan hullámokat fogunk kelteni, mint amilyeneket vettünk. Így csak idő-felbontású feltételek birtokában járhatunk el. Esetünkben az ábrázolások fényérzékeny hordozóján levő oszcillogramok körfelbontásainak fotógrafikus összegezése útján helyreállítottuk a kiindulási hullámtér képét (6. ábra, alul).

Lényegében a helyreállítást az ismert holográfiai elvek alapján végeztük el, csupán azzal a különbséggel, hogy az észlelési pontokban nem egyetlen, hanem bármelyik időpontra vonatkozó információval rendelkezünk a tér fázisairól és amplitúdóiról. Ilyen információt bonyolult optikai hullámterek esetében gyakorlatilag lehetetlen kapni. Ezért a holografikus folyamatnak az optikában való megvalósítása céljából egyszerűsíteni kell a hullámtér szerkezetét a rezgések teljes monokromatikusságáig, majd mesterségesen kell létrehozni két tér interferenciáját: a vizsgált- és a referencia-térét, s ily módon kell létrehozni az álló-hullámok terét, vagyis olyan teret, melyet fázistagolással lehet rögzíteni a fényképezési lemezen annak dacára, hogy a rögzítés folyamata sokkal tovább tart, mint az elektromágneses hullámok rezgésének egy periódusa.



Hogy a hullámtér segítségével meg lehessen kapni a tárgy fényképét, a következő feltételeket kell betartani: a tárgy méreteinek jelentősen meg kell haladniuk a hullámhosszat, és felületén olyan amplitúdójú egyenetlenségeknek kell lenniük, mely nagyobb a hullámhossznál. Ezek a feltételek teljesülnek az optikában, ahol a fény hullámhossza mindössze  $0,0004 - 0,0008$  mm, a szabad szemmel látható tárgyak méretei pedig rendszerint meghaladják az  $1$  mm-t, vagyis több tízezerszer nagyobbak a hullámhossznál. A látható tárgyak többségének felszínén levő egyenetlenségek nagyobbak a fény hullámhosszánál.

A szeizmikus holográfia vagy fotográfia módszerének létrehozásához, mely teljesen analóg az optikaival, először is nem a tükörsíma réteghatárookra kell irányt venni, mint ez a korszerű szeizmikus kutatásban elfogadott, hanem a földtani jellegű lokális inhomogenitásokra, melyek a kőzetek viszonylag homogén közegébe vannak belefoglalva, s melyek felületüknek méretei és érdekessége szempontjából kielégítik a hullámhosszal képzett fenti összefüggést. Ha a szeizmikus kutatásban megtartjuk az  $50 - 100$  m-es hullámhosszakot, úgy nyilvánvalóan nem fogunk ilyen földtani objektumokat találni. Következésképpen, a szeizmikus kutatásnak az optikai holográfiával analóg módszere kidolgozásával kapcsolatos a nagyfrekvenciás szeizmikus hullámtér gerjesztésének problémája. Ha például  $1$  m-es szeizmikus hullámhosszat veszünk fel, úgy a gerjesztett tér frekvenciájának  $2 - 3$  ezer Hz-nek kell lennie, de a rugalmas hullámok ennyire nagyfrekvenciás terei gyorsan csillapodnak és nem hatolnak nagy mélységbe. Következésképpen igen nagy teljesítményű rengéskeltőkre van szükség. Ilyen rengéskeltőket elvben létre lehet hozni, azonban ha arra veszünk irányt, hogy az optikából a holografikus eljárást pontosan olyan formában vegyük kölcsön, mint ahogy azt ott alkalmazzák (frekvencia térrel), akkor a rengéskeltők iránt szigorú követelményeket kell támasztani a szeizmikus sugárzás monokromatikussága és koherenciája tekintetében. Ez bonyolulttá teszi a feladatot. Ha viszont az optikából az ábrázolások regisztrálásának fotografikus eljárását kölcsönözzük ki, úgy törölhetjük a rengéskeltők iránti fenti követelményeket, de a hullámterek lencsés fókuszálási rendszerei komoly torzításokat fognak okozni; a lencsére  $10^\circ$  és  $20^\circ$  szögek alatt beeső hullámok a pont ábrázolása helyett ív-képet adnak, melynek hossza legalább a hullámhossz  $20 - 30$ -szorososa. Az optikában a  $20 - 30$  hullámhosszra elnyúló „pont” nem különböztethető meg szabad szemmel, a szeizmikában az analóg „pont” átmérője a természetben  $20 - 30$  m lesz, de csak akkor, ha sikerül a hullámhosszat  $1$  m-re lecsökkenti.  $20 - 30$  m átmérőjű pontokból nem lehet leképezni kis földtani objektumok ábrázolását, az olyan nagy földtani objektumok átlós szélessége pedig, melyek, tegyük fel, ilyen „pont” méreténél  $100$ -szor nagyobb átmérővel rendelkeznek,  $2 - 3$  km lesz. Lehetséges, hogy találunk ilyen objektumokat, de ezeknek olyan mélységekben kell települniök, melyek átmérőjüket legalább  $2 - 3$ -szorosán meghaladják, vagyis a földfelszíntől mért  $6 - 10$  km mélységben. Következésképpen, rövid hullámok nagy mélységekbe való behatolásának problémája súlyosbodik. Emellett újból felmerül a hullám rövidítésének szükségessége, hogy lehetővé váljon pl. *max.*  $100$  m átmérőjű és legfeljebb  $1 - 2$  km mélységben települő földtani objektumok „*lefényképezése*”. Ehhez át kell térni a szeizmikus hullámok deciméteres tartományára, viszont ezeknek a földben mért  $1,5 - 3$  km-es terjedési sebessége mellett már az ultrahang tartomány frekvenciáira van szükség.



A fentiek arra a következtetésre vezetnek, hogy olyan szeizmikus holográfiai vagy fotográfiai módszert kell létrehozni, mely lényegesen különbözik az analóg optikai módszerektől. És ebben a tekintetben a szeizmikus kutatás rendelkezik a szükséges előfeltételekkel. Ezekhez tartozik mindenekelőtt a szeizmikus hullámterek időbeli felbontással történő regisztrálásának lehetősége, vagyis az oszcillografikus eljárás (például, mágnesszalagon).

Az ilyen jellegű felvétel megőrzi a rezgési folyamat valamennyi fázis-és amplitúdó-jellegzetességét, ezen kívül visszajátszható: Ez új utakat nyit a szeizmikus holográfiai és fotográfiai módszerek előtt, melyeknél teljesen megszűntek a hullámterek inkoherenciájával és polikromatikusságával kapcsolatos korlátozottságok.

A „szeizmikus ábrázolások” időfelbontással regisztrált kiindulási adatok mellett nemcsak amplitúdó- (energetikai), hanem fázis-információt is tartalmazhatnak. Ezeknek az ábrázolásoknak érzékelése természetesen nem lehet pontosan olyan, mint az optikában, ahol a hullámhossz összemérhetetlenül kicsi a megvilágított tárgyakhoz képest, de a szeizmikus hullámok megrövidítése nélkül aligha sikerül megváltoztatni valamit ebben a tekintetben. Az oszcillografikus felvételek segítségével készített ábrázolások fázisszerkezetének megőrzésén kívül az új hullámtér-helyreállítási módszernek még az alábbi hasznos sajátosságai lépnek fel: 1. a tér ábrázolása előállítható bármilyen adott időpillanatra, valamint egymásutáni pillanatok egész sorára, vagyis szinte olyan filmkockák sorozatát lehet újból létrehozni, melyek jellemzik a tér „életét” az adott időszakos folyamán; 2/a tér képeit ki lehet alakítani mind az  $XZ$  síkban, azaz az  $XY$  észlelési síkra ortogonális síkban, mind az  $X'Y'$  síkban, azaz az észlelési síkkal párhuzamos, de attól tetszés szerinti  $Z_n$  távolságban levő síkban.

A kísérleti vizsgálatok összes fentebb közölt eredménye az  $XZ$  síkra vonatkozik, de az  $X'Y'$  síkban végzendő analóg vizsgálatok elveit szintén kidolgoztuk. Külön megjegyzendő, hogy a hullámtér képének a fenti módszerrel az  $X'Y'$  síkban történő helyreállításánál, mely a hologram vagy a fókuszáló lencse síkjától olyan messze van, mint a fokális sík és a lencse közötti távolság, olyan hullámtér-képet fogunk kapni, mely egyenértékű a holografikus vagy fotógrafikus módszerrel fényképezési lemezen kapott fotólenyomattal, melyet a tér fokális tartományába helyeztek, ahol a tényleges holográfiai ábrázolás kialakul. A leírt módszerrel kapott ábrázolások fő eltérése a fotografikus és holografikus ábrázolásokból csupán abban lesz, hogy azok a pillanatnyi fényképeknek felelnek meg, melyeket azon feltétel érvényesülés mellett készítenek, hogy az exponálási idő sokkal rövidebb a hullámtér egy rezgési periódusának időtartamánál. Ha az objektívok fényképezési zárjai olyan sebességgel tudnának működni, mely lehetőséget adna például  $10^{-15}$  sec-os exponálási idők alkalmazására, úgy közönséges fényképezőgép segítségével pontosan olyan felvételt kapnánk, mint amelyet a tér oszcillografikus felvételei alapján kaphatunk a fentebb ismertetett eljárással, vagyis olyan felvételt, melyen a tér energiájának a fotólemez síkjában való eloszlásán kívül rögzítve lenne ezen tér fázisszerkezete is.

### Összefoglalás

A szeizmikus kutatásban, mint az ábrázolások regisztrálásának bármilyen más módszerénél, felhasználható mind a fotografikus (lencses), mind a hologra-



fikus (lencsenélküli) eljárás. A szeizmikus hullámok kis frekvenciái lehetőséget adnak arra, hogy futó hullámok terének regisztrálásánál oszcillografikus és kinematografikus eljárásokat alkalmazzunk, ami biztosítja a szeizmikus holográfiában nemcsak monokromatikus, hanem polikromatikus (zaj) terek felhasználásának lehetőségét.

Az elvégzett vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy az ábrázolások fényérzékeny hordozón való fotografikus összegezésével imitálni lehet a hullámterek fotografikus és holografikus átalakítási folyamatait és meg lehet kapni a kiindulási tér mintegy pillanatnyi fényképét a hullám-maximumok és minimumok képeinek megőrzésével, vagyis a tér teljes fázis-amplitúdó szerkezetével.

Megállapítást nyert, hogy fénylő pontok képeinek torzulásai, melyeket a lencse okoz ferde sík frontú harmonikus hullám terének fókuszálásánál, jelentős értékeket érnek el a frontnak már  $10 - 20^\circ$ -os dőlése esetén is. A „pont” helyett ilyen esetben ív képe alakul ki, mely kidomborodó oldalával a hullámfrontok emelkedési irányába esik. Az ezen ívet képező periódusok száma a vízszintes front fókuszálásánál kapott  $1 - 2$ -ről  $20 - 30$ -ra nő dőlt front fókuszálásakor.

Megállapították, hogy a lineáris diffrakciós rács, melyben a diffrakciós pontok a Frenel-féle gyűrűkön helyezkednek el (lineáris hologram), sokkal rosszabbul fókuszálja a hullámteret, mint a vele ekvivalens „lineáris lencse”, ami könnyen magyarázható azzal, hogy a kialakított képben hiányzik a Frenel-féle zónás gyűrűk kiterjedt epicentrális részéből származó információ. Az optikában a fókuszálásnak ezt a hibáját nem lehet észrevenni, mivel ott a hullámhosszak kicsinyek, a hologramok aperturái viszont (a hullámhosszhoz viszonyítva) rendkívül nagyok. A szeizmikában a holografikus fókuszálás felfedezett hibáját figyelembe kell venni, különösen azokban az esetekben, mikor hosszú hullámokat ( $50 - 100$  m) használnak rövid robbantópont-geofon távolság mellett.

A fókuszált tér képének minőségére nagy hatást gyakorol a hullámok vevő és gerjesztő berendezéseinek aperturája és diszkrétsége. A  $80$ ,  $40$  és  $10$  m-hullámhosszú aperturákkal kapott képmások azt mutatják, hogy  $10 \lambda$  apertúra és  $20 \lambda$  fókuszmélység esetén a tér lencsés fókuszálásának effektusa gyakorlatilag eltűnik.

A berendezés diszkrétsége a helyreállított képmás peremi részein „ív” formájú kísérősávok képződésére vezet. Ez a kísérőjelenség csaknem teljesen hiányzik, mikor a gerjesztési pontok közötti távolság  $0,5 \lambda$ .  $1,0 \lambda$  távolság esetén széles ív jelenik meg;  $1,3 \lambda$  távolság esetén a sáv szélessége csökken, de az ábrázolás élessége leromlik.

Nagyon meggyőző eredményt kaptunk zajterek szeizmikus holográfiában való felhasználási lehetőségének kísérleti ellenőrzésénél. Megvizsgáltuk a zajtér legegyszerűbb esetét, melyet két különböző frekvenciájú harmonikus tér szuperponálása és interferenciája útján képeztünk. A létrejött pulzációkat oszcillografikus eljárással regisztráltuk. Ezután az oszcillogramok alapján helyreállítottuk a kiindulási tér képét. A kapott képen jól látható a két különböző frekvenciájú tér, melyek a sík két pontjában fókuszálódnak. Ez a kísérlet szemléletesen megerősíti azt a következtetést, hogy minden esetben, mikor gyakorlatilag megvalósítható a tér regisztrálása időbeli felbontással, a tér ismét helyreállítható oszcillogramok alapján attól függetlenül, hogy a tér mono- vagy polikromatikus-e. Következésképpen, a hullámterek koherenciájának problémája különös élességgel csak azokban az esetekben vetődik fel, mikor a hul-



lámtereket nem lehet oszcillografikus eljárással regisztrálni, például az optikában.

A végrehajtott kísérleti vizsgálatok arra a következtetésre adnak módot, hogy az optikai eljárásokkal teljesen analóg szeizmikus fotografiai és holográfiai módszerek csak abban az esetben hozhatók létre és válhatnak hatékonyá ha olyan rugalmas hullámokat sikerül felhasználni a földtani objektumok „átvilágítására”, melyek hossza 100 – 1000-szer rövidebb ezen objektumok átmérőjénél. Az összes egyéb esetben nincs értelme annak, hogy teljes analógiára törekedjünk az optikai és szeizmikus képrögzítési módszerek között. A szeizmikus képmásokban ilyenkor célszerű megőrizni a hullámtér fázisszerkezetét és felhasználni azt a holografikus és fotografikus ábrázolások kiegészítő értelmezéséhez, melyek élessége elvileg nem lehet nagy a kutatási objektum átmérőjének és a hullámhossznak azonos nagyságrendje miatt.

A vizsgálati eredmények alapján előzetes véleményt lehet mondani a „színes szeizmikus holográfia” módszerének létrehozási lehetőségéről, vagyis a képmásoknak a rugalmas hullámok polikromatikus tereiben való regisztrálásáról. Feltehető, hogy a polikromatikus holográfia útja a közetfizikai tulajdonságok meghatározásának hatékony eszköze lesz, vagyis olyan szeizmikus módszerré válik, mely bizonyos mértékben analóg a színes fényképezéssel, lehetővé téve a tárgyak színe alapján azok fizikai tulajdonságainak felismerését.

Befejezésül néhány szót szeretnénk mondani a szeizmikus holográfia terén végzendő további kutatások irányairól. Úgy látszik, hogy jelenleg az új módszer kifejlesztésének útján két olyan probléma áll, melyek megoldása nélkül elvileg lehetetlen a rugalmas hullámok terével „megvilágított” holográfiai objektumok éles ábrázolását előállítani. Az első probléma a következőképpen fogalmazható meg: olyan technikai-módszertani eszközöket kell találni, melyek biztosítják a szeizmikus vizsgálatok 5 – 10 km mélységig való elvégzését a rugalmas hullámok 0,1 – 10 m közötti hullámhossza mellett. Ennek a problémának megoldása lehetővé teszi, hogy a hullámok fázisosan tagolt képeiről rátérhessünk a közönséges fényképekkel analóg energetikai, integrál ábrázolásokra. Ezen probléma megoldásának nehézsége abban rejlik, hogy a nagyfrekvenciás rugalmas rezgések gyorsan csillapodnak a kőzetösszletekben és nagyon nehéz egyeztetni a szeizmikus kutatás mélységi behatolásának megőrzését (5 – 10 km) a nagyfrekvenciás terekre való rátéréssel.

A második probléma a szeizmikus vevőberendezések aperturáinak növekedése és a hullámok szelvénymenti regisztrálásáról a területi regisztrálásra való átmenet; ilyenkor az szükséges, hogy a területi észlelési pontok közötti távolságok ne legyenek nagyobbak a hullámhossz felénél. Ha négyszög alakú vételi elrendezést veszünk alapul 100 hullámhosszal egyenlő oldalhosszúsággal, úgy a diszkrét eljárásnál 40 ezer észlelési pont szükséges. Természetesen felmerül annak szükségessége, hogy a szeizmikus hullámterek regisztrálásának más, célszerűbb eljárásait keressük, melyeknél nincs szükség a geofonok szétrakására és a terepen való áthelyezésére, vagyis ki kell dolgozni a szeizmikus hullámok „kontaktmentes” vételi és regisztrálási módjait.

A fentebb említett problémák nagyon bonyolultak és sokoldalúak, de aligha indokolt, hogy ezeket megoldhatatlanoknak tekintsük. Ezekben az irányokban kutatási jellegű elméleti és kísérleti vizsgálatokat, valamint feltalálói tevékenységet kell végezni.