

Képfeldolgozás többdimenziós rendszerelmélet segítségével

HANS MARKO

Müncheni Műszaki Egyetem, Híradástechnikai Tanszék

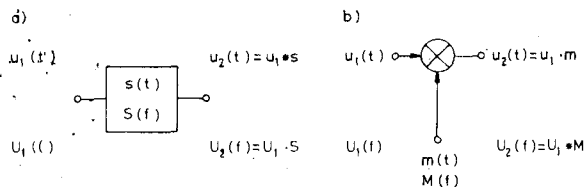


Összefoglalás:

A K. Küpfmüller által megalapított hírközlés rendszerelméletét lehet többdimenziós jelekre, mint például álló vagy mozgó képekre vagy képsorozatokra, alkalmazni. Itt a matematikai módszerekre utalunk. Sok példával illusztráljuk az optikai képfeldolgozási módszerek alkalmazását.

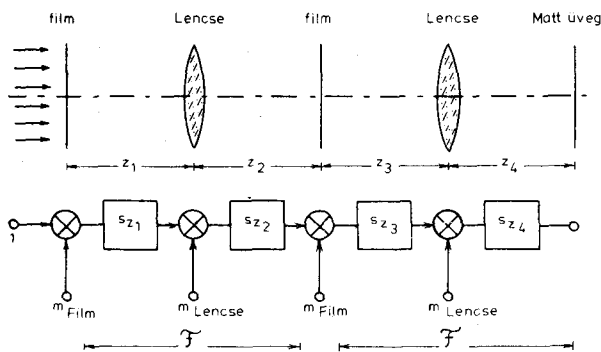
1. Matematikai alapok

A hírközlés rendszerelmélete [1] időjelekkel, tehát egydimenziós folyamatokkal foglalkozik. Az egydimenziós Fourier-transzformációt használja fel arra, hogy az $u(t)$ időjelhez hozzárendelje az $U(f)$ spektrumát. Az 1. ábra a jelátvitel, valamint a jeltranszformáció alapszabályait mutatja be a hírközlés két legfontosabb rendszertípusánál, azaz a lineáris és időinvariáns rendszernél, illetve az ideális modulátornál [2]. Itt a * szimbólum a konvolúciót jelenti, vagyis a következő műveletet



H293-1

1. ábra. Egydimenziós rendszerelmélet alapszabályai a. lineáris időinvariáns rendszer; b. ideális modulátor



H293-2

2. ábra. Koherens-optikai képfeldolgozó rendszer; Fourier-transzformáció részére

Fordította: Koutny Iлона
Elhangzott az 1987. máj. 6—7-én tartott VDE konferencián.

HANS MARKO

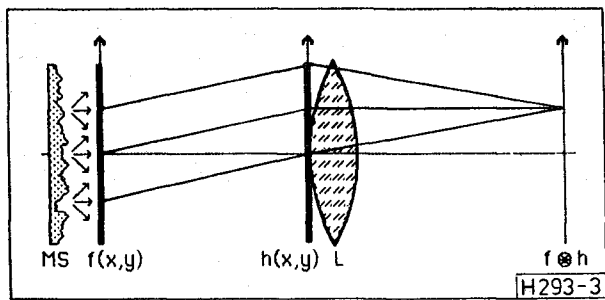
A Stuttgarteri Műszaki Egyetemen tanult és doktorált. 1953-ban lépett be a mostani stuttgarteri Standard Elektrik Lorenz AG-be fejlesztő mérnökként. Azután 10 évig az átviteltechnika területén dolgozott az iparban, majd a Müncheni Műszaki Egyetem Híradástechnikai Intézet vezetésével bízták meg. Következésképpen foly-

tatta kutatómunkáját az átvitel és az ehhez kapcsolódó területeken: számos irányművelő tanulmányt írt pl.: a biológiai rendszerekben történő jelfelvételről, -feldolgozásról és -átvitelről. A VDE Híradástechnikai Társasága a Kari Küpfmüller díjjal tüntette ki. 1986-ban a Darmstadti Műszaki Főiskola a Tiszteletbeli Mérnök-doktor címet adományozta neki.

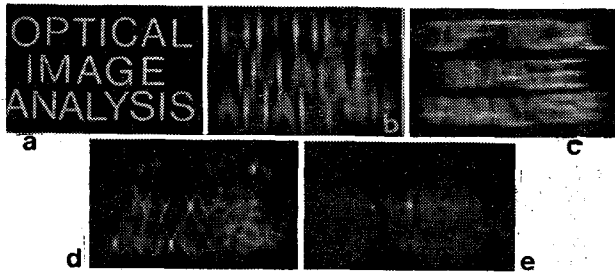
$$u_1 * u_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(t-x)u_2(x) dx.$$

A lineáris időinvariáns rendszer átviteli függvénye (rendszerfüggvénye) $S(f)$, súlyfüggvénye $s(t)$. Ezek $s(t) \leftrightarrow S(f)$ Fourier-párok. Ugyanígy az ideális modulátor tetszőleges vivőfüggvénye $m(t) \leftrightarrow M(f)$. Ugyanezeket a matematikai műveleteket át lehet vinni többdimenziós jelekre. Ezt mutatja be a szerző az ún. 'homogén rendszerek' esetén, melyek például az idegrendszer ingerületátviteléhez modellként szolgálhatnak. A [3]-ban találjuk ennek a rendszerelméletnek a koncepcióját és törvényszerűségeit. Az optikában és képfeldolgozásban is lehet alkalmazni a többdimenziós (itt kétdimenziós) rendszerelméletet, különösen a koherens fény felhasználásával. A [4]-es munka foglalja össze az ehhez szükséges számításokat és módszereket. A továbbiakban megadunk egy koherens-optikai képfeldolgozó rendszert, melyet rendszerelméleti módszerekkel le lehet írni és melyen megfelelő dimenzióválasztásnál lokális Fourier-transzformációt lehet végrehajtani.

A 2. ábra felső részében egy képfeldolgozásban alkalmazott koherens-optikai elrendezés látható. Az alsó rendszerelméleti modell lineáris, térinvariáns részek (térbeli átvitel) és ideális modulátorok (filmek és lencsék) láncolatából áll. Egy lencse modulációfüggvénye megfelel egy kvadrátikus fázisfüggvénynek. Ha a lencsék gyújtótávolságai a z_1 és z_2 geometriai távolságnak felelnek meg, a tér-lencse-tér hozzárendelés alkalmazása Fourier-transzformációt valósít meg. Egy, kétlépcsős Fourier-transzformáló szakaszról álló rendszer úgy hat mint egy lineáris térinvariáns rendszer, amelynek az $S(f_x, f_y)$ átviteli függvényét az $m_{\text{film}}(x, y)$ modulációfüggvény adja meg. Amennyiben $S(f_x, f_y)$ komplex vagy bipoláris, holográfikusan előállított függvényeket kell használni a Fourier-sí-



3. ábra. Mattüveg-korrelátor. $f(x, y)$ bemenőfüggvény; $h(x, y)$ rendszerválasz; $f(x * h)$ korrelációfüggvény



4. ábra. Nem koherens-optikai korreláció. a. bemenőfüggvény; b. korreláció függőleges csíkokkal; c. korreláció vízszintes csíkokkal; d. korreláció A -betűkkel; e. korreláció a bemenőjellel, ami az autokorrelációs függvényt adja.

kon. Egy ilyen hozzárendeléssel minden lineáris szűrőműveletet végre lehet hajtani. Így például alkalmazni lehet a zajok jelenlétében történő optimális jelszűrés (Wiener-szűrő) is zajos képekre.

2. Kísérletek és illusztrációk

A lineáris rendszerelmélet alapötletét nagyon szépen be lehet mutatni a régen ismert mattüveg-korrelátor segítségével (3. ábra): a bemenő képsík minden képpontja ugyanazt, a rendszert jellemző világosságeloszlást hozza létre a kimenő képsíkon, a hozzárendelt helyen. A bemeneti pontok világosságával súlyozott súlyfüggvények összege a kimeneti jelet konvolúciós szorzatként adja. A mattüveg-korrelátor, melyet Meyer-Eppler [5] vezetett be, megengedi a helyi sáv szélesség szorzatot 10^5 -ig [6, 7].

Illusztrációként az f bemenő függvény legyen az 'OPTICAL IMAGE ANALYSIS' betűsorozat és korreláljuk ezt néhány függvénnyel, melyeknek az eredményét könnyen lehet interpretálni. Az eredményeket a 4. ábra foglalja össze. Meg kell jegyeznünk, hogy nemkoherens-optikai feldolgozás esetén mind a jel, mind a felbontás magja egypólusú függvény.

A nemkoherens-optikai feldolgozásnak egy további, érdekes alkalmazása az a modell [8], amely a tengelyentúli tomográfiában a kép előállítását szemlélteti: ebben a technikában a röntgen-átvilágításból nyert vetületekből számolják ki a rétegek képeket [9, 10]. Rendszerelméletileg ez azt jelenti, hogy a leképezendő tárgyról csak vonalintegrálok ismertek, ahol is egy bizonyos irányban a vonalintegráljai a centrális metszet

elmélete alapján a tárgy Fourier-transzformáltjainak a lefedését adják egy olyan egyenes mentén, amely erre az irányra merőleges és a frekvencia-tartomány origóján átmegegy. A mindenirányú vetületek együtt teljesen kitöltik a frekvencia-tartományt, mégis a frekvencia értékével arányos csillapítással, ami viszont könnyen javítható.

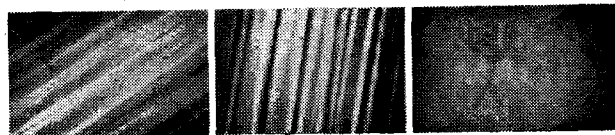
Így nemkoherens optikai úton elegánsan meg lehet mutatni az összes vetület visszavetítését és összegzését: egy szokásos optikai leképezéshez beteszünk egy hengerlencsét, így vonalas pontválaszt kapunk, amivel szimuláljuk a vetítést és visszavetítést. Ha a hengerlencsét folyamatosan forgatjuk, akkor a visszavetítések összegződnek az ún. 'layergram'-ban, melyet ha a

$$H(f_x, f_y) = k \cdot (f_x^2 + f_y^2)^{0,5} \text{-tel}$$

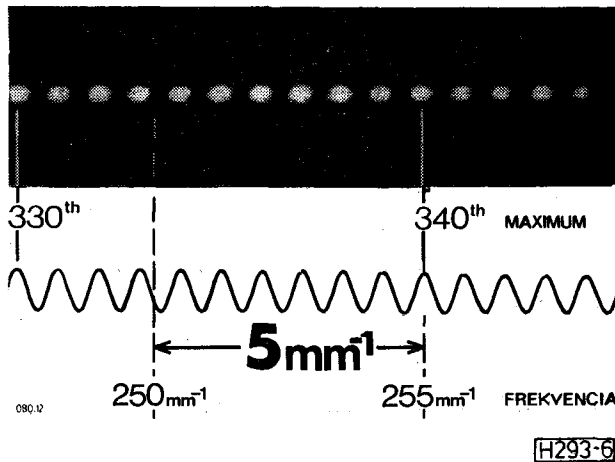
lineárisan és helyinvariánsan megsűrűnk, a rétegek ideális rekonstrukciójához jutunk. Az 5. ábra mutatja a layergramok létrehozását.

Az adatátvitel fizikai korlátai miatt a tomográfia abban a helyzetben van, mint egy fényképész, akinek csak hengerlencsái vannak a felvételhez. Mivel egy gömbfelülettel határolt lencsének pontszerű leképezése van, ezért a végtelen sok pontsorozat összetételével és az azt követő szűréssel megfelelő vonalas leképezést kapunk. A számítógépes tomográfiában megnehezíti a dolgot az, hogy a vetületeknek csak véges halmazát lehet mérni, ami bizonyos korlátozásokhoz vezet. Ezek speciális képbontó elméletekkel kezelhetők [8, 11].

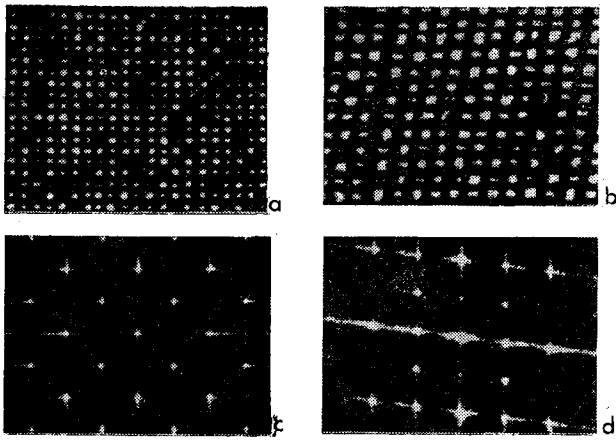
Mint a cikk első részében megmutattuk, a kép-függvények Fourier-transzformáltjait koherens fény segítségével elő lehet állítani. A koherens-optikai Fourier-transzformáció pontossága általában nagyon nagy. A 6. ábra egy részletet mutat egy teljesítményspektrumból a 340. nullahely



5. ábra. Layergramok létrehozása visszavetítésekből: a., b. két különböző visszavetítés; c. layergram

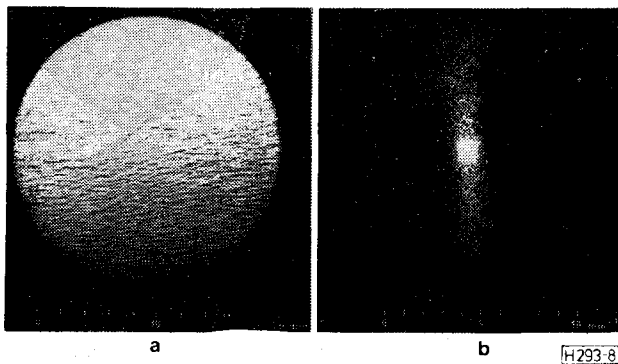


6. ábra. Egy oszlop Fourier-transzformáltja, részlet a 340. nullahelynél



H293-7

7. ábra. Textilszövet szálegyenesség-mérése: a. normális szövet (mozgó); b. torzult szövet (mozgó); c. a. teljesítményspektruma (stacionárius); d. b. teljesítményspektruma (stacionárius).



H293-8

8. ábra. Tengerfelszín légi felvételének a teljesítményspektruma: a. kép; b. teljesítményspektrum.

környezetében. A kísérletileg közölt intenzitás-lefolyásból meg lehet becsülni, hogy az eltérés legalább 7 nagyságrenddel van a nulla alatt [2].

Képjel teljesítményspektrumának az előállítása hasznos transzformáció, ha a képről globálisan akarunk valamit megtudni [13]. A 7. ábra egy mérési módszert mutat be textilszövet szálegyenességének a megállapítására [14]. A szövetet e célból lézerrel átvilágították. Mivel ehhez meg kell oldani nagy felületen a pontos szögmérést, és ráadásul az anyag állandóan mozog a gyártósoron, digitális (soros) megvalósításnál hatalmas adatfolyamokat kellene kezelni.

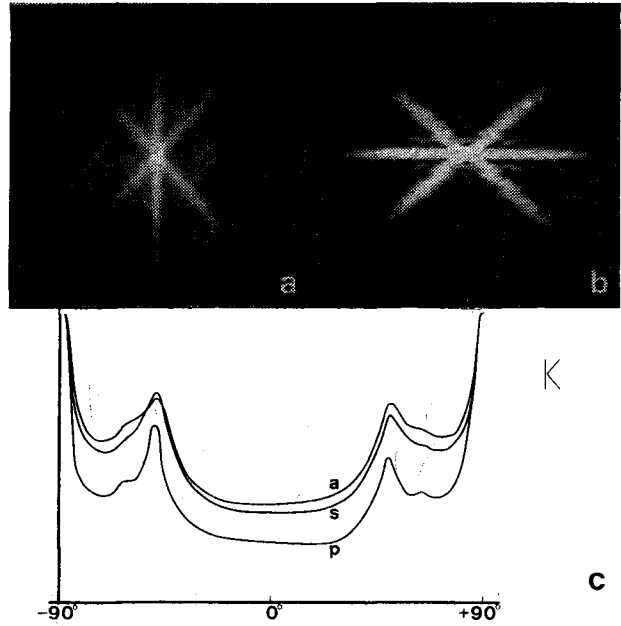
Egy további példa (8. ábra) tengerfelszín légi felvételeinek a kiértékelését mutatja [15, 16].

A minta nagyságfüggetlen jellemzésére szolgáló függvényt megkapjuk a vonalak integráljából, függetlenül ezeknek az irányításától, a teljesítményspektrum origóján keresztül [13]. A 9c ábra ezt a jellemzőfüggvényt (*s* görbe) ábrázolja a *K* mintához. Az általános Parseval-tétel alkalmazása azt mutatja, hogy ez a függvény ugyancsak megkapható az autokorrelációs függvényben a megfelelő centrális vonalintegráljából (*a* görbe). Egy másik lehetőség, hogy ezt a függvényt helyi tartományban meghatározzuk, a minta kvadrált vetületei (*p* görbe), a centrális metszet tételének a segítségével [17]. A három görbe közötti eltérések

a kísérleti felépítés illesztési pontatlanságának tulajdoníthatók.

A képelemzés új útját annak a technikának a kifejlesztése jelentette, amely lehetővé teszi egy kép leírását annak helyi teljesítményspektrumai-val. Ezt a négydimenziós függvényt egy azonos, olyan holografikusan előállított lencséből álló lencsetömb hozza létre, melyek egy-egy, általában egymást átfedő, megszabható ablakfüggvényű Fourier-csatornát valósítanak meg. Az egyes helyi teljesítményspektrumok átfedését globális sávkorlátozással lehet elkerülni. A 10. ábra egy elméleti próbálkozást mutat [16, 18].

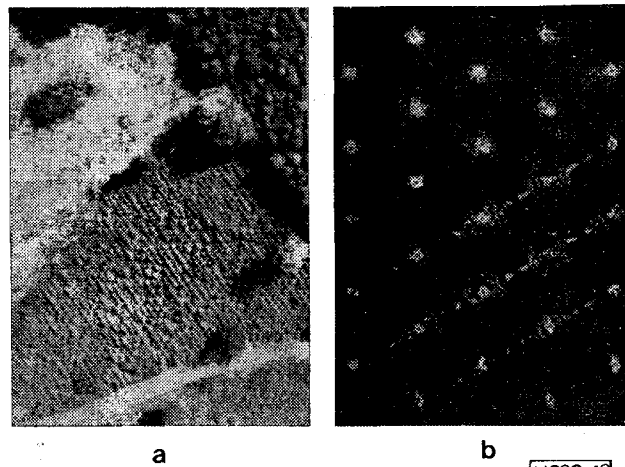
Rokon négydimenziós jelábrázolások a többszörösen sávszűrt képkivonatok [18]. Ezen az



H293-9

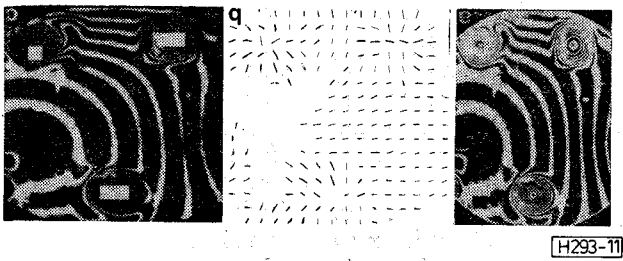
9. ábra. Szögjellemező-függvény vonalas integrálmérésekből:

a. a *K*-minta autokorrelációs függvénye; b. a *K*-minta teljesítményspektruma; c. szögmérték az *a*-ból (*a* görbe), *b*-ből (*s* görbe) és metszetekből (*p* görbe).

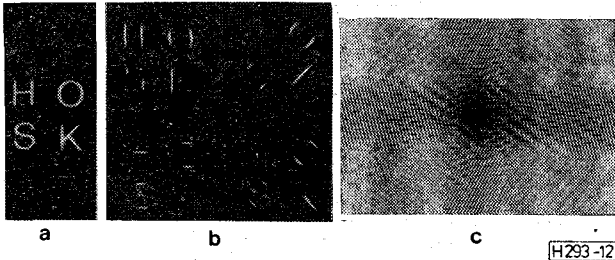


H293-10

10. ábra. Egy légi felvétel helyi teljesítményspektrumai: a. kópfüggvény; b. helyi teljesítményspektrumok



11. ábra. Anyagtorzulások ábrázolása: a. a munkadarab interferogramja; b. gradiensmező; c. hibahelyek detekciója



12. ábra. Többsatornás szűrő: a. jel; b. eredmény; c. szűrőhologram (nagyítás)

alapon fejlesztettek ki egy optikai-digitális képiértékelő-rendszert az interferogramok részére, amely egy munkadarabnak nagyság és irány szerinti helyi deformálódásait állapítja meg gradiensmező-ábrázolásban. Minden sávszűrőkivonatot helyi letapogatásban ábrázolnak, ahol is a keletkező gradiensképben minden képpontnál annak a sávszűrőnek a paraméterei (a középfrekvencia és a szög nagysága) vannak megadva, amelyikre ott legnagyobb a kimenőjel [19]. A 11. ábra egy tipikus interferogram gradiensképét mutatja a hibahelyek detekciójának a továbbfejlesztésével.

A kombinált négydimenziós hely- és frekvenciatartományban a képjel egy általános ábrázolása az ún. Wigner disztribúciós függvény [20]; ebből mi az előbb egy speciális esetet mutattunk be. Ezt a függvényt is elegánsan elő lehet állítani koherens-optikai módon [21].

A koherens-optikai feldolgozás leghatásosabb lehetősége a komplex helyi frekvenciaszűrés szűrőhologramok segítségével. Ezeket mint a jeldetektációhoz módosított, illesztett szűrőket [22], vagy pedig mint a jelvisszaállításához jel/zaj viszonyra optimált inverzszűrőket [23] lehet alkalmazni. Holografikus szűrőket általában mint többsator-

nájú szűrőket lehet megvalósítani. A 12. ábra egy négycsatornás szűrőt mutat, mely irányok meghatározására alkalmas [24].

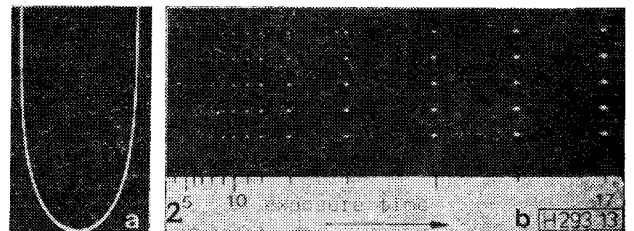
J. Hofer-Alfeis kísérlete a koherens-optikai szűrésre ad hatásos eredményt [25, 26]. Az inverzszűrőt, Stroke módszere szerinti, U-alakú törőfüggvényként állították elő; 5 ilyen U-ívből álló jelet megszürték, és az eredményt különböző megvilágítási időkkel regisztrálták. A 13. ábra eredményei illusztrálják a nagy számú pontosságot.

Más speciális szűrő pl. a Lanzl-féle gradiensösszeg-szűrő [28], mely a $\delta/\delta x + i\delta/\delta y$ operátort valósítja meg, természetesen általában tárgytól függő sávkorlátozással. A 14. ábra egy ilyen példát mutat számítógépes hologramként [29] megvalósított pontválasszal [8].

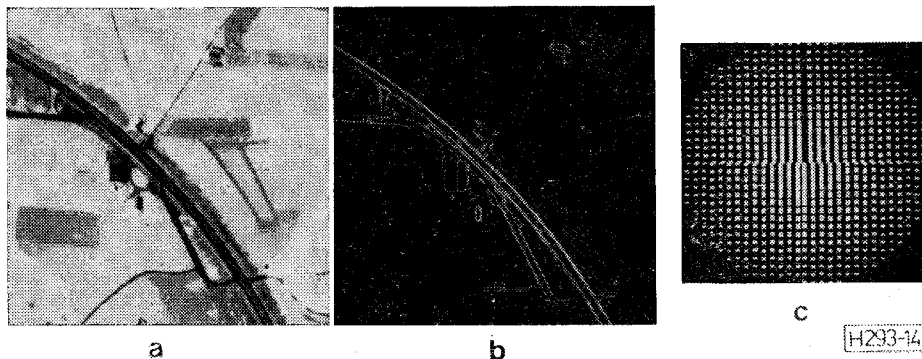
A kép visszaállítás wieneri kritériumainak megfelelő optimális szűrést [30, 31, 32] mutat a 15. ábra nukleáris orvosi képanyag feldolgozása terén.

Egy koherens-optikai processzor tényleges feldolgozóképeségének a mindenkori hely- és frekvenciatartományban előforduló 107 jelértékének csak egy részét mutatják a példák.

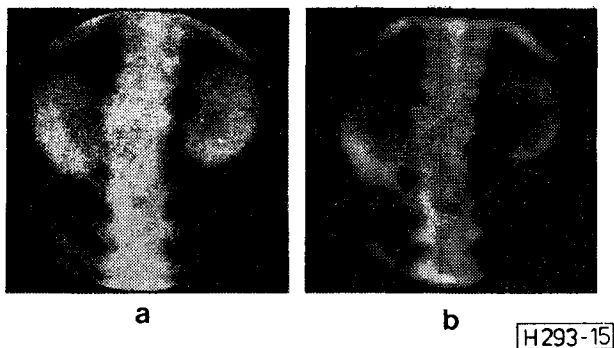
A jelek koherens-optikai feldolgozásánál rendelkezésre álló magas helyi sávzélesség-szorozatot fel lehet használni arra, hogy több képet egyidejűleg egymástól külön vagy pedig együtt kezeljenek. Ezek a képek lehetnek például magasabb dimenziójú jelekből metszetek, mint pl. mozifilmnél; fel lehet sorakoztatni a háromdimenziós $(x-y-t)$ függvény ekvidisztáns időszeleteit. Ha a bemeneti függvény és a pontválasz pontsorozat formájában adott, akkor szimulálni lehet egy háromdimenziós konvolúciót. Ebben az esetben ugyanis a szűrő eredménye éppen az a sorozat, ami tulajdonképpen a kívánt háromdimenziós felbontást reprezentálja. [33, 34]. Ehhez a sorozat-



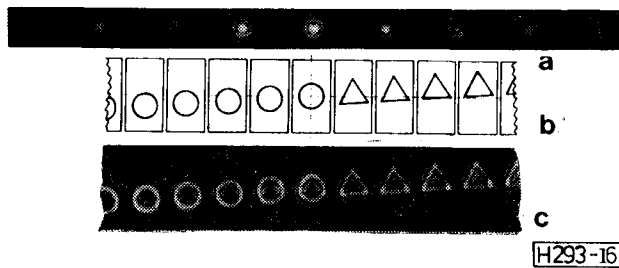
13. ábra. Stroke szerinti inverzszűrés: a. törőfüggvény; b. szűrőeredmény különböző megvilágítási időkkel



14. ábra. Egy légi felvétel gradiensszűrése: a. bemenő kép; b. eredmény; c. a pontválasz számítógépes hologramja (erős nagyítás)



15. ábra. Szeintigram optimális szűrése: a. szűrés nélkül; b. szűrve



16. ábra. Sorozatfelbontás: a. a z-modell pont-impulzus-válasz sorozata; b. bemenő sorozat; c. kimenő (eredmény) sorozat

felbontásos módszerhez példaként egy modellt implementáltunk az emberi vizuális rendszer hullámszerű jelfeldolgozásához. Ez az ún. 'z-modell' [35] gömbszimmetrikus háromdimenziós sávszűrőt igényel a következő (nem szeparálható) átviteli függvénnyel (egy időbeli fázisfaktort elhagytunk):

$$H(z) = z^2 \cdot e^{-z^2}, \text{ ahol } z^2 = f_x^2 + f_y^2 + f_z^2$$

Egy koherens-optikai filtert állítottunk elő, melynek a pontválasza a z-modell pont-impulzus-válaszának a sorozatábrázolása (16a ábra). A bemeneti jelet is sorozatként ábráztuk (16b ábra). A 16c ábra mutatja a kísérleti szűrési eredményt.

Köszönetnyilvánítás

A képanyag feldolgozásáért a szerző köszönetet mond munkatársainak, H. Platzernek, R. Basamlernek és H. Glündernek.

I R O D A L O M

- [1] *Küpfmüller, K.*: Die Systemtheorie der elektrischen Nachrichtenübertragung. Stuttgart: Hirzel-Verlag, 1949.
- [2] *Marko, H.*: Methoden der Systemtheorie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1977.
- [3] *Marko, H.*: Die Systemtheorie homogener Schichten. Kybernetik 5 (1969) S. 221—240.
- [4] *Marko, H.; Platzer, H.*: Anwendung der mehrdimensionalen Systemtheorie in Optik und Bildverarbeitung. ntz-Archiv 3, H. 9, 1981.
- [5] *Meyer-Eppler, W.*: Die funktionalanalytische Behandlung des Schattenproblems. Optik 1, 1946.
- [6] *Rogers, G. L.*: Noncoherent optical processing. New York, London, Sydney, Toronto: John Wiley & Sons, 1977.
- [7] *Monahan, M. A.; Bromley, K.; Bocker, R. P.*: Incoherent optical correlators. Proc. IEEE 65, 1977.
- [8] *Platzer, H.*: Optical image processing. Proc. 2nd. Scand. Conf. Image Analysis, Helsinki, June 15—17, 1981.
- [9] *Barrett, H. H.; Swindell, W.*: Analog reconstruction methods for transaxial tomography. Proc. IEEE 65, 1977.
- [10] *Hermann, G. T.* (ed.): Image reconstruction from projections. Topics in Applied Physics 32, Springer, Berlin, 1979.
- [11] *Platzer, H.*: Abtastung durch winkelperiodische Geradenbüschel: Das Sampling-Theorem der Computertomographie. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Hans Marko. Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der TU. München, 1985.
- [12] *Platzer, H.; Glünder, H.*: A high precision 2 D signal analysis, performed coherent optically as a preceding step in picture deblurring. Proc. Electro-Optics/Laser Int. 80 Conf., Brighton, 24.—27.3. 1980. Surbiton: Kiver Communications 980.
- [13] *Lendaris, G. G.; Stanley, G. L.*: Diffraction-pattern sampling for automatic pattern recognition. Proc. IEEE 58, 1970.
- [14] *Platzer, H.; Hofer, J.*: Laseranwendungen in der Textilindustrie. Laser + Elektro-Optik (1975) H. 1.
- [15] *Stilwell, D.; Pilon, R. D.*: Directional spectra of surface waves from photographs. J. of Geophys. Res. 79, 1974.
- [16] *Platzer, H.; Glünder, H.*: Generation and use of local power spectra by coherent optics. In: Machine-aided image analysis 1978. The Inst. of phys. Conf. Series 44. Bristol, London: The Inst. Phys., 1979.
- [17] *Glünder, H.*: Integrals along central slices through the power spectrum and the autocorrelation function. Optics Comm. 57, 1986.
- [18] *Glünder, H.; Bamler, R.*: Coherent-optically performed operations in a 4D compound space-spatial frequency domain with applications in image analysis and quality control. Proc. SPIE 397, 1983.
- [19] *Glünder, H.; Lenz, R.*: Fault detection in non-destructive testing (NDT) by an opto-electronic hybrid processor. Proc. SPIE 370, 1983.
- [20] *Wigner, E.*: On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. Phys. Rev. 40, 1932.
- [21] *Bamler, R.; Glünder, H.*: The Wigner distribution function of two-dimensional signals: coherent optical generation and display. Optica Acta 30, 1983.
- [22] *Van der Lugt, A.*: Signal detection by complex spatial filtering. IEEE Trans. IT — 10, 1964.
- [23] *Stroke, G. W.; Halioua, M.; Thon, F.; Willasch, D. H.*: Image improvement and three-dimensional reconstruction using holographic image processing. Proc. IEEE 65, 1977.
- [24] *Platzer, H.*: Der Laser in der kybernetischen Forschung. Laser und Elektro-Optik 3, 1971.
- [25] *Hofer, J.*: Optical reconstruction from projections via deconvolution. Opt. Com. 29 (1979) H. 1, S. 22—26.
- [26] *Hofer, J.*: Reconstruction from projections for analog transaxial tomography by coherent-optical deconvolution. Proc. Int. Opt. Comput. Conf., Washington, 7.-11.4. 1980, S. 216—221. Soc. of Photo-Opt. Instrum. Eng. proc. 231. Bellingham/USA: SPIE-Publ. 1980.
- [27] *Stroke, G. W.; Zech, R. G.*: A posteriori image-correcting „deconvolution” by holographic Fourier-transform division. Physics Letters 25A, 1967.
- [28] *Görlitz, D.; Lanzl, F.*: A holographic spatial filter for direction independent differentiation. Japan. J. appl. Phys. 14, Suppl. 14-1, 223—228 (1974).