REFLEXIÓS SZEIZMIKUS ADATOK CSÖKKENTETT BITSZÁMÚ FELDOLGOZÁSA

KORVIN GÁBOR, PETROVICS ILONA

Bevezetés

A dolgozatban beszámolunk az utóbbi években végzett kísérleteinkről, amelyekkel azt kívántuk eldönteni, hány bit pontossággal szükséges elvégezni a szeizmikus adatfeldolgozás alapvető eljárásait. Úgy találtuk, hogy a néhány bitet — szélsőséges esetben csupán az adatok előjelét — felhasználó feldolgozás egyenértékű lehet a teljes adatdinamikát igénybevevő eljárással.

Problémafelvetés és történeti áttekintés

Ha átlapozzuk az utóbbi években megjelent szeizmika irodalmat, meglepődve vesszük észre, hogy a szeizmikus adatfeldolgozáshoz szükséges dinamikatartomány kérdésében a szerzők véleménye korántsem egységes. Az 1971-es moszkvai kőolaj világkonresszuson SAVIT és MATEKER "From "Where?" to "What?"-jával egy időben POLSHKOV megemlíti, hogy a szeizmikus csatornák az *extrémumok* megadásával is jól leírhatók. Az 1973-as SEG ülés (Mexico City) és a 74-es EAEG találkozó (Madrid) kellemes meglepetése — a sok bright spot előadás között —, amikor SAVIT bejelenti, hogy 4 *bit lebegőpont és az előjelbit* elegendő a VIBROSEIS mérési anyag feldolgozásához. Az 1974-es dallasi SEG ülés már külön szekciókban foglalkozott a közvetlen szénhidrogén detektálás, ill. az előjeles feldolgozás kérdéseivel.

A digitális szeizmika, célkitűzéseit és dinamikaigényét tekintve, két fő irányra osztható: *morfoszeizmikára* és *litoszeizmikára*. Az elnevezés LEENHARDT és DELSERRE 1974 cikkéből származik, a két irányzat világos megkülönböztetése jóval előbb, MATEKER 1971, SAVIT és MATEKER 1971 dolgozatában megtörtént. LEENHARDT és DELSERRE szerint:

"... if by means of reflection, we can determine the shape of a reflector—it could be called *morphoseismics*"

"... as we have come to lithology by means of seismics, we propose to call this method *lithoseismics*"

vagyis:

a morfoszeizmika a reflexiós határfelületek *geometriai viszonyait*, a litoszeizmika ezen túlmenően a *litológiai paramétereket* határozza meg.

A litoszeizmika, többek között, a következő paraméterek meghatározására törekszik:

a) Folyamatos, pontos intervallumsebesség (pl. a TELEDYNE Corp. CONVEL eljárása, vagy a WESTERN cég VELAN eljárása);

b) Intervallumsebességből homok—agyag arány meghatározása (TEGLAND 1970);

c) Intervallumsebesség-anomáliákból túlnyomásos zónákra következtetés (JANKOWSKY 1971);

d) Intervallumsebességből sűrűség és rugalmas paraméterek becslése (Jankowsky 1971);

e) Intervallumsebesség és abszorpciós együttható együttes értelmezésével üledékes kőzetek osztályozása (Savit és Mateker 1971, Korvin 1973, Volarovich et al. 1969);

f) Amplitúdó-anomáliák alapján sztratigráfiai csapdák kimutatása (Savit 1960a, b; Garotta 1971; Belyayeva et al., 1966; Lyons és Dobrin 1972 stb.);

g) Szénhidrogén közvetlen kimutatása (Diekman és Wierczeyko 1970; Craft 1973; Savit 1973, 1974; Lindsey 1974; Hilterman 1974; Backus és Chen 1974; Stone 1974; Quarles 1973 stb.).

A fenti kérdéskörnek szentelt legtöbb dolgozat megemlíti a nagydinamikájú regisztrálás és a relatív amplitúdóarányokat megőrző, lehetőleg *lebegőpontos* feldolgozás szükségességét. (Craft 1973 pl. 10^{-38}-tól 10^{+38}-ig terjedő dinamika lebegőpontos ábrázolásáról beszél!) Nem tudunk olyan dolgozatról, amely a nagy dinamika *nyilvánvaló* szükségességének hangsúlyozásán túl meghatározta volna, hány bit szükséges valóban az egyes litoszeizmikus célok eléréséhez.

Köztudott, hogy a „klasszikus" *morfoszeizmikus* feldolgozás céljaira a nagydinamikájú digitális felvételek anyaga erősen *redundáns*.

Savit (1973, 74) kísérletei szerint Vibroseis anyag elsődleges feldolgozásához az előjel és a négy ifp bit, robbantással nyert anyag feldolgozásához 21 bit terjedelmű fixpontos dinamika elegendő. Szovjet kutatók (Polshkov et al. 1971; Zaharchenko és Korosztüsevszkij 1973) megállapítják, hogy a szeizmikus csatorna a minimum- és maximumhelyek megadásával gyakorlatilag meghatározott. Csupán a maximumhelyek figyelembevételével reflexiódetektálás is végrehajtható (Paulson és Merdler 1968), a nullátmenetek felhasználásával automatikus sebességanalízis végezhető (Barr 1971). Általános tapasztalat, hogy a legtöbb szeizmikus anyag 4 — sőt esetenként 8 — millisecundumos átmintavételezéssel feldolgozható. További adatkompressziót kínál a Rademacher, Walsh és Paley transzformáció alkalmazása (Bois 1974; Wood 1974).

A szeizmikus felvételek redundanciáját legdrasztikusabban úgy csökkenthetjük, ha az adatok helyett csupán ezek előjelét hagyjuk meg.

Melton és Karr már 1957-ben felvetette az előjelkoincidencia felhasználását jeldetektálás céljára (elméleti megalapozás és további irodalom Carlyle 1968-as cikkében található). Intézetünkben 1972-ben készítettük el az előjelkoincidencián alapuló sebességanalízis programot, hasonló megoldást közöl Cochran 1973. Dolgozatának érdekessége, hogy javasolja az előjeles sebességanalízis cél-hardware-rel való megvalósítását.

A hírközléselméletben régóta ismert, hogy az előjelekkel végzett korrelációs műveletek sok esetben kielégítő eredményt adnak perióduskutatás és teljesítményspektrum-becslés céljára (Van Vleck, 1943, 1966; Ossenberg, 1968). Fara és Scheidegger (1961) porózus közegek geometriájának leírására, Carrs és Neidell (1966) rétegsorok ciklicitásának bizonyítására használja az előjel-koincidencia korrelációt. Bortfeld és Ristow (1969) szerint terepi megjelenítés céljára a szeizmikus felvételeknek a Vibroseis-sweep előjeleivel való korrelációja is elegendő lehet.

Megemlítjük, hogy a legtöbb szeizmikus plotter dinamikatartománya 7—10 bit, de sekélyszeizmikus vizsgálatoknál csupán a zérus-átmeneteket megjelenítő kiírásmód (Meidav, 1969), stacking szelvények, vagy a legkisebb offsetű, korrigálatlan csatornákból álló szelvény esetén az adatok előjelbitjének kiírása (1 ha $x < 0$, 0 ha $x \geq 0$) is meglepően sok információt szolgáltat.

Mennyi információt tartalmaz egy szeizmikus csatorna?

Tételezzük fel, hogy a digitális mágnesszalagon, vagy a számítógépben, minden egyes szeizmikus adatot m bittel kódolunk; a szeizmikus csatorna adatainak száma legyen $N + 1$, a mintavételi távolság Δt, a digitálás előtti jelek felső határfrekvenciája f_{max}, a csatorna teljes időtartama T. Helyes mintavételezés esetén fennállnak a következő összefüggések:

$$2f_{max} \cdot \Delta t = 1; \qquad T = N \cdot \Delta t; \quad N = T \cdot 2f_{max}. \tag{1}$$

Ideális esetben, ha az adatok egymástól függetlenek, a csatorna információtartalma maximális:

$$I = I_{max} = (N + 1)\, m \text{ bit} \approx 2f_{max} \cdot T \cdot m \text{ bit}. \tag{2}$$

A gyakorlatban előforduló szeizmikus csatornák információtartalma természetesen ennél mindig kisebb, hiszen az egymásutáni adatok korrelálnak, a spektrum $[0, f_{max}]$-ban nem fehér.

Tételezzük fel például, hogy az f_{max}-ig fehér spektrum helyett a spektrum csak $f_1 < f_{max}$-ig terjed és $f_0 < f_1$-nél maximumot mutat. A csatorna leírásához szükséges szabadsági fokok száma (l. Brillouin, 1956)

$$M = 2f_1 \cdot T + 1,$$

az információtartalom tehát nem több mint

$$I = (2f_1T + 1)\, m \approx 2f_1 \cdot T \cdot m < I_{max}. \tag{3}$$

Mivel a spektrum $[0, f_1]$-ben sem fehér, a tényleges információtartalom még kisebb. Legyen $f_0 \ll f_m$ (pl. $f_0 = 30$ Hz, $f_m = 250$ Hz), tételezzük fel, hogy az adatok előjellel együtt m bites, fiktív egész számok, ekkor — ha a spektrum f_0-ban rezonanciaszerű maximumot mutat — egy mintavételi ciklus alatt az adatok változása nem nagyobb, mint

$$\max_t \left| 2^{m-1} \sin 2\pi f_0 t - 2^{m-1} \sin 2\pi f_0 (t + \Delta t) \right| \le$$

$$\le \max_t 2^{m-1} \Delta t \cdot 2\pi f_0 \,|\cos 2\pi f_0 t\,| = 2^{m-1} \Delta t \cdot 2\pi f_0 = \pi\, 2^{m-1} \left(\frac{f_0}{f_{max}} \right). \tag{4}$$

Bevezetve a

$$\delta = \log_2 \left(\pi \cdot 2^m \frac{f_0}{2f_{max}} \right) \tag{5}$$

jelölést, az előbbi feltételek esetén az egymás utáni adatok különbsége nem haladhatja meg a δ bitet. Nézzük meg az összes különböző csatorna számát. Az első adat 2^m féleképpen választható, a második $2 \cdot 2^\delta = 2^{\delta+1}$-féleképpen stb., az összes lehetséges csatorna száma tehát

$$N_{\text{lehetséges}} = 2^m (2^{\delta+1})^N, \tag{6}$$

így egy csatorna információtartalma legfeljebb

$$I = \log_2 N_{\text{lehetséges}} = m + (\delta + 1) N.$$

A (2) és (5) egyenletek felhasználásával

$$I = m + (\delta + 1)N = m + \left(m - \log_2 \frac{2f_{max}}{\pi \cdot f_0}\right)N = I_{max} - N \cdot \log_2 \frac{2f_{max}}{\pi \cdot f_0}, \qquad (7)$$

vagyis adatonként kb. $\log_2 \frac{2f_{max}}{\pi f_0}$ bit redundáns ($f_{max} = 250$ Hz, $f_0 = 30$ Hz esetén a redundancia kb. adatonként 2 bit).

A (6) egyenlet érdekes alkalmazásaként tekintsük a szeizmikus adatok azon ábrázolását, ahol az adatok mantisszáját m_1 bittel, a BGC-t 4 bittel írjuk le, és tegyük fel, hogy a BGC adatonként legfeljebb 6 dB-lel (vagyis 1 bittel) változhat. Az egy adat ábrázolásához alkalmazott bitszám $m = 4 + m_1$, a maximális információ tehát

$$I_{max} = (N + 1)m = (N + 1)m_1 + (N + 1)4.$$

A BGC-re tett megkötések miatt a BGC értékekben különböző csatornák száma

$$N_{lehetséges} = 2^4 \cdot 2^{2N},$$

tehát adatonként kb. 2 bit elegendő a BGC leírására — ahogy ezt a SEG *A* formátum is előírja (Northwood et al., 1967).

Ha elfogadjuk a szovjet iskola megállapítását, hogy az extrémumhelyek megadása jellemzi a csatornát (Zaharchenko és Korosztüsevszkij, 1973), újabb becslést nyerhetünk a csatornák redundanciájára.

f_0 domináns frekvencia esetén — az extrémumhelyek Poisson eloszlását feltételezve — a csatorna megadásához várható értékben $2N\, \Delta t f_0$ extrémumot kell megadnunk. Az extrémumok értékét m bittel, helyüket egy összesen N bites sorozattal megadva, a várható információtartalom:

$$I = 2N\, \Delta t f_0 m + N = N\left(\frac{f_0}{f_{max}} \cdot m + 1\right) \ll I_{max}. \qquad (8)$$

Legalább hány bitet tartalmazzon egy szeizmikus csatorna?

A kérdés megválaszolása előtt emlékeztetünk az információelmélet egy megállapítására (Brillouin, 1956), amely szerint *a számítógépes feldolgozás nem növeli az adatsorokban eredetileg meglevő információmennyiséget. A szeizmikus csatornában legalább annyi információnak kell lennie, amennyi információt a szeizmikus csatornából a feldolgozás során nyerni kívánunk.*

Tekintsük példaként az intervallumsebesség meghatározását. Több szerző (pl. Kunetz, 1963; Claerbout, 1968; Eisner, 1970; Lindseth, 1972) szerint robbantópontközeli egyedi csatornákból dekonvolúcióval és a szintetikus szeizmogram számítás algoritmusának megfordításával, vízszintes rétegződés esetén, intervallum sebességet lehet számítani. Fizikailag természetesen nem várható, hogy a domináns szeizmikus frekvenciának megfelelő hullámhossz 1/12-énél vékonyabb rétegeket ki tudjunk mutatni (Craft, 1973). A domináns frekvenciát f_0-val, az átlagos sebességet c-vel jelölve, a kimutatható rétegvastagság alsó határa $c/12f_0$. Ha a teljes időtartomány $T = N \cdot \Delta t$, az ennek megfelelő mélységtartomány

$$z = \frac{c \cdot N\, \Delta t}{2},$$

és a sebességeloszlás szabadsági fokainak száma

$$N^* \approx 2z \cdot \frac{12 f_0}{c} = c \cdot N\, \Delta t \frac{12 f_0}{c} = 12 N\, \Delta t f_0 .$$

Ha a meghatározandó különböző intervallumsebesség-értékek száma N_v, az intervallumsebességek meghatározásából várható információ

$$I_v = 12 N\, \Delta t f_0 \log_2 N_v = 6N \frac{f_0}{f_{max}} \log_2 N_v \tag{9}$$

A (8) egyenlet szerint becsülve a szeizmikus csatorna tényleges információtartalmát, a sebességmeghatározás szükséges feltétele, hogy

$$I = N\left(\frac{f_0}{f_{max}} \cdot m + 1\right) > N \cdot \frac{f_0}{f_{max}} \cdot m \geq 6 \cdot \frac{f_0}{f_{max}} \cdot N \cdot \log_2 N_v ,$$

vagyis

$$m \geq 6 \cdot \log_2 N_v .$$

Ebből látható, hogy nagy felbontóképességű, pontos sebességanalízishez *nagybitszámú* feldolgozás szükséges. Ha megelégszünk $\lambda/2$ vastagságú rétegek kimutatásával, a sebességmeghatározásból várható információ

$$I_v = 2 \cdot N\, \Delta t f_0 \log_2 N_v = N \cdot \frac{f_0}{f_{max}} \cdot \log_2 N_v , \tag{10}$$

vagyis, ebben az esetben, a bitszámnak az

$$m \geq \log_2 N_v \tag{11}$$

egyenlőtlenségnek kell eleget tennie. Ha például 100 különböző intervallumsebességet akarunk kimutatni, az adatokat 6—7 bittel kell kódolnunk. 6-szoros fedés esetén például, a közös mélységponthoz tartozó csatornák adatait 1 bittel kódolva, elméletileg is megvan a lehetőség arra, hogy intervallumsebesség adatokat nyerjünk. A kódolás történhet az adatok előjele szerint (Cochran, 1973) vagy a negatívból pozitívba tartó nullátmenetek megjelölésével (Barr, 1971).

A sebességanalízis kérdésével kapcsolatban még megjegyezzük, hogy a sebességmeghatározás információtartalma a (9) és (10) képletben megadott értéknél általában kisebb, a soron következő rétegek sebességeinek korrelációja miatt (Kats et al., 1969; Korvin, 1973).

Nehéz feladat lenne hasonló módon megbecsülni, hány bit szükséges az egyes litoszeizmikai feladatok megoldásához. Az abszorpciós együttható becslésével kapcsolatban pl. felvetődhet, hogy lineáris abszorpciós mechanizmus esetén az együttható a domináns frekvencia eltolódásából számítható (Bereznev és Malovichko, 1972, Huang Jen-Hu, 1961), ez utóbbi viszont a nullátmenetek gyakoriságának számolásával vagy a Van Vleck algoritmussal is meghatározható (Carrs és Neidell, 1966). Bizonyos esetekben a szeizmikus hullámok elnyelődésében nem a lineáris abszorpciós mechanizmus dominál (Petrovics et al., 1975), így az abszorpciós törvény meghatározásához a domináns frekvencia vizsgálata nem elég, teljesítményspektrumokat kell számítani (Rapoport, 1969). *Elegendő hosszú időablakok* esetén elméletileg a teljesítményspektrum polaritáskorrelációból (Van Vleck, 1943, 1966), ill. auto-relaiskorrelációból (Ossenberg, 1968; Nuttal, 1958) is számítható; rövid időablakok esetén az abszorpciós együttható számításához lényeges a nagyfrekvenciás komponensek pontos ismerete, tehát a nagy adatdinamika.

Az optimális mintavételezés és kvantálás kérdéséhez: a bitszám és a dinamika kapcsolata

Az előző fejezetben a szükséges bitek számát a feldolgozástól várható információmennyiségből kiindulva vizsgáltuk. Tekintsük most át a kérdéskört a szeizmikus jelek és a felvevőműszerek dinamikatartományának szempontjából.

Ha a szeizmikus mérés folyamán t_1 és t_2 időpillanatok között regisztrálunk szeizmikus jeleket, a legnagyobb jel csúcsamplitúdója η_1, a legkisebbé η_2, a szeizmikus rezgés dinamikatartománya

$$D_A = 20 \lg \frac{\eta_1}{\eta_2} \text{ dB}. \tag{12}$$

A dinamikatartományt az η_1 és η_2 jelek spektrumából is becsülhetjük, ekkor

$$D(f) = 20 \lg \frac{|S_1(f)|}{|S_2(f)|} \text{ dB}, \tag{13}$$

ahol S_1 és S_2 az η_1, ill. η_2 jelek spektruma. A (13) képletből megállapított dinamikatartomány frekvenciafüggő, a tényleges dinamikát úgy állapíthatjuk meg, hogy széles frekvenciasávon a (13) kifejezés maximumát vesszük.

A legnagyobb jel nagyságára és spektrumára csak a rezgéskeltés mechanizmusának és a felszínközeli összlet tulajdonságainak pontos ismeretében következtethetünk. A legkisebb hasznos jel nagyságát és spektrumát a szférikus divergencia, reflexiós veszteségek és az abszorpció figyelembevételével becsülhetjük (Born, 1941; Posgay et al., 1971; Gurvich, 1973; Sheriff, 1973; Byakov és Ryazanova, 1974), ehhez azonban a területre vonatkozó sebesség és abszorpciós adatok szükségesek. A D_A dinamikatartomány meghatározásának jelenleg elképzelhető egyetlen módját abban látjuk, hogy η_1-et a felvevő műszerrel érzékelhető legnagyobb jelamplitúdónak választjuk, a legkisebb kimutatni kívánt η_2 jel helyett viszont azt a talajnyugtalanság szintje alatt levő legkisebb jelszintet vesszük, amely a rendelkezésre álló energiakeltő és feldolgozási eszközökkel a zajháttérből még kiemelhető.

A szeizmikus *felvevő műszer* D_I dinamikatartományának szokásos definíciója

$$D_I = 20 \lg \frac{A_{max}}{\bar{A}_N} \text{ dB}, \tag{14}$$

ahol A_{max} a műszerrel torzítás nélkül érzékelhető legnagyobb jel amplitúdója, $\bar{A}_N$ a műszer saját zajának várható amplitúdószintje.

Ha a szeizmikus felvételek regisztrálása *digitális formában* történik — egy adatot az előjellel együtt összesen m bittel ábrázolva — a regisztrálás dinamikatartománya

$$D_d = 20 \lg 2^{m-1} = 6(m-1) \text{ dB}. \tag{15}$$

A regisztrálás dinamikatartományát célszerű a felvevő műszerénél valamivel nagyobbra választani, hogy a műszerzajnál kisebb jelek számítógépes feldolgozással kimutathatók legyenek (GURVICH, 1973 szerint pl. 6—7 bitet célszerű ilyen célokra a műszerzaj ábrázolására áldozni).

Helyesen választott felvevő műszer, konverter és regisztrálási módszer esetén

$$D_A \leq D_I < D_d, \tag{16}$$

vagyis, (12) és (15) összevetésével

$$m-1 > \frac{D_A}{6} \tag{17}$$

adódik a digitális regisztrálásnál szükséges bitek számára. A szeizmikus jelek dinamikatartománya által indokolt bitszám és az adatsoroknak a feldolgozás során tapasztalt redundanciája közötti paradoxon okai a következők lehetnek:

1. Digitális jelek üzembiztos átviteléhez és tárolásához egy bizonyos fokú redundancia okvetlenül szükséges. (Indokolt pl. a 9 sávos digitális mágnesszalagok SEG *A* formátumában az a kikötés, hogy az *U* és *G* bitek helyes felírásának *ellenőrzésére* megadott időközönként a BGC értékek *tényleges* értéke is szerepeljen.)

2. A nagydinamikájú szeizmikus adatfeldolgozás eredményét jóval kisebb dinamikájú plotteren jelenítjük meg.

3. Elsődleges feldolgozásnál sokszor nem célunk a reflexiós szintekről beérkező jelek alakjának pontos ismerete, csupán a jel *beérkezését*, tehát több csatornán egy időben való megjelenését kell detektálnunk. Ilyen esetben a jeldetektálás előjelkoincidencia módszerekkel is elvégezhető (CARLYLE, 1968).

4. A szeizmikus jelek dinamikatartományát a (12) vagy (13) egyenlet szerint becsülve gyakran nem veszünk tudomást a talajnyugtalanságról és a műszerzajról, és így (17)-ből irreálisan nagy bitszámot kapunk, vagy nem rendelkezünk olyan eljárással, amellyel a zajszint alól a kis jeleket kiemelhetnénk.

5. A szeizmikus jelek dinamikatartományának megállapításakor (12) esetén nem vesszük figyelembe, hogy különböző időkapukban, ill. (13) esetén a különböző frekvenciasávokban más-más lehet a dinamikatartomány, tehát pl. az időben állandó bitszámot alkalmazó digitális regisztrálás bizonyára nem optimális.

Az 5. pont megvilágításához néhány szót kell szólnunk az analóg jelek *optimális mintavételezésének és kvantálásának kérdéséről* (l. pl. BRILLOUIN, 1956, GOODMAN, 1966).

GOODMAN (1966) nyomán a következőképpen vázoljuk az analóg jelek mintavételezésének és kvantálásának folyamatát. A mintavételezendő $x(t)$ analóg jelet egy W Hz sávszélességű ideális aluláteresztő szűrőn bocsátjuk át, a szűrés kimenetéből $1/2W$ sec időközönként mintát veszünk, a kapott y_i mintákat valamilyen módon n osztályba soroljuk és minden y_i mintavételi értéknek megfeleltetjük az $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \ldots \hat{y}_n$ számok valamelyikét. Az $\hat{y}_i$ számokat $\log_2 n$ bitet felhasználva binárisan kódoljuk, és egy R bit/sec kapacitású digitális hírközlő csatornán egy távoli számítógépbe küldjük, vagy R bit/sec sebességgel digitális információhordozón rögzítjük. Az információt a vevő oldalon dekódoljuk, és digitális vagy analóg technikával visszaállítjuk az $x(t)$ jel egy $\hat{x}(t)$ közelítését. Az információtovábbítás (letárolás) R bit/s sebessége rögzített, az optimális mintavételezés és kvantálás feladata az $1/2W$ mintavételi köz, a kvantálás lépcsőinek száma (n), és az $\hat{y}_1, \ldots, \hat{y}_n$ olyan megválasztása, hogy az

$$E[(x(t) - \hat{x}(t))^2] \tag{18}$$

várható hiba minimális legyen.

Foglalkozzunk először az $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \ldots, \hat{y}_n$ kvantálási szintek optimális megválasztásával. Tegyük fel, hogy az x valószínűségi változó értéke $[0, 1]$-ben egyenletes eloszlású. Készítsük el a $[0, 1]$ intervallum tetszőleges

$$0 = x_0 < x_1 < x_2 < \ldots < x_{n-1} < x_n = 1 \tag{19}$$

felosztását és kvantáljuk x-et a következő módon:

$$x = q_k, \quad \text{ha} \quad x_{k-1} \leq x < x_k, \tag{20}$$

ahol $q_1, \ldots, q_n$ tetszőleges számok. A kvantálás várható hibája

$$E = \sum_{k=1}^{n} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (x - q_k)^2\,dx = \sum_{k=1}^{n} \int_{x_{k-1}}^{x_k} \left(x - \frac{x_{k-1} + x_k}{2}\right)^2 dx +$$

$$+ \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{k-1}) \left(\frac{x_{k-1} + x_k}{2} - q_k\right)^2.$$

Látható, hogy a q_k-k optimális választása

$$q_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2},$$

ez esetben a hiba várható értéke

$$E = \sum_{k=1}^{n} \int_{x_{k-1}}^{x_k} \left(x - \frac{x_{k-1} + x_k}{2}\right)^2 dx = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{k-1})^3. \tag{21}$$

Bevezetve a

$$\mu_k = x_k - x_{k-1}; \qquad k = 1, 2, \ldots, n$$

segédváltozókat, az $\{x_k\}$ felosztás optimális megválasztásához a következő feltételes szélsőértékfeladatot kell megoldanunk:

$$\mu_1^3 + \mu_2^3 + \ldots + \mu_n^3 = \min,$$

$$\mu_1 + \mu_2 + \ldots + \mu_n = 1.$$

A feladatot a Lagrange-paraméter bevezetésével megoldva, optimális megoldásnak

$$\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_n = \frac{1}{n} \tag{22}$$

adódik, tehát az optimális kvantálást a $[0, 1]$ intervallum *ekvidisztáns felosztása* adja vagyis a

$$q_k = \frac{2k - 1}{2n}, \quad \text{ha} \quad \frac{k-1}{n} \leq x < \frac{k}{n} \tag{23}$$

képlettel definiált kvantálás. A hiba várható értéke (21) és (22) szerint:

$$E = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{k-1})^3 = \frac{1}{12} \cdot \frac{1}{n^2} . \tag{24}$$

Vizsgáljuk most meg egy Δt mintavételi közzel digitalizált szeizmikus csatorna optimális kvantálásának a kérdését. Tételezzük fel, hogy a csatorna amplitúdómenete exponenciálisan csökken, az

$$e^{-at} = e^{-an\,\Delta t} \tag{25}$$

törvényszerűség szerint. Az információtovábbítás (ill. rögzítés) sebessége legyen R nat/s (1 nat = 1.442695 bit). Tegyük fel, hogy az első N mintát egyenként n_1 lépcsővel, a második N mintát n_2 lépcsővel stb. kvantáljuk.

Az egyes időszakaszokban fellépő hibák, (24) szerint:

$$E_1 = \frac{N}{12} \cdot \frac{1}{n_1^2} ,$$

$$E_2 = \frac{N}{12} \cdot \frac{1}{n_2^2} \cdot e^{-2aN\,\Delta t} ,$$

$$E_3 = \frac{N}{12} \cdot \frac{1}{n_3^2} \cdot e^{-4aN\,\Delta t} ,$$

$$\vdots$$

M időszakasz esetén az összhiba

$$E = \frac{N}{12} e^{2aN\,\Delta t} \sum_{k=1}^{M} \frac{1}{n_k^2} e^{-2aNk\,\Delta t} .$$

Az n_i lépcsőt felhasználó kvantálás esetén egy adat leírásához $\ln n_i$ nat információt kell továbbítani, M időablak esetén $MN\,\Delta t$ idő alatt összesen

$$N \sum_{k=1}^{M} \ln n_k$$

nat információt, ahol

$$\frac{N \sum_{k=1}^{M} \ln n_k}{MN\,\Delta t} = R \text{ nat/s.}$$

Az n_k kvantálási lépésszámok optimális megválasztásához a

$$\left.\begin{aligned} \sum_{k=1}^{M} \frac{1}{n_k^2} e^{-2aNk\Delta t} &= \min \\ \sum_{k=1}^{M} \ln n_k = MR\,\Delta t &= Q \end{aligned}\right\} \tag{26}$$

feltételes szélsőértékfeladatot kell megoldanunk. Bevezetve a $\nu_k = \ln n_k$ jelölést, (26) egyszerűbb alakot ölt:

$$\left.\begin{aligned} \sum_{k=1}^{M} e^{-2\nu_k - 2aNk\Delta t} &= \min \\ \sum_{k=1}^{M} \nu_k \qquad &= Q \end{aligned}\right\} \tag{27}$$

Bevezetve a λ Lagrange-paramétert, egyszerű számolással a következőt kapjuk az optimális kvantálásra:

$$\nu_k = R\,\Delta t + \alpha N\,\Delta t\left(\frac{M+1}{2} - k\right). \tag{28}$$

A (28) egyenlet jelentése: exponenciálisan csökkenő burkolójú analóg jeleket Δt mintavételi távolsággal és R nat/s információtovábbítási lehetőséggel úgy kódolhatunk optimálisan, ha *a nagyobb dinamikájú szakaszokon több lépcsőt, a kisebb dinamikájú szakaszokon kevesebb lépcsőt alkalmazunk.*

Az előbbi eredmény, tudomásunk szerint, az irodalomban nem ismeretes. Hasonló vizsgálatokat végzett Goblick (1965), ő azonban a (25) exponenciálisan csökkenő burkoló helyett az $x(t)$ folyamat spektrumának exponenciális csökkenését tételezte fel.

Néhány gyakorlati példa reflexiós szeizmikus adatok csökkentett bitszámú feldolgozására

Az utóbbi években számos kísérletet végeztünk a reflexiós mérési adatok csökkentett dinamikájú feldolgozására.

Valamennyi kísérletünket az ELGI MINSZK-32 számítógépén, az Intézetünkben kidolgozott DSZK programrendszer felhasználásával végeztük. A gép 64 k szó kapacitású, fix- és lebegőpontos aritmetikájú, 37 bit szóhosszúságú (a rutin szeizmikus feldolgozás 18 bit-re normált adatokkal, fixpontosan történik). A vizsgálatokat robbantással keltett, SDT—1, SDT—2, SD—10 magyar, ill. magyar—NDK fejlesztésű digitális felvevőműszerekkel regisztrált, többszörös fedésű szeizmikus anyagokon végeztük. Az eredmények kiíratása 7 bit dinamikájú szelvényíróval történt.

A dekonvolúció hatásosságának megítélésére és a többszörösök kimutatására rutinszerűen számítunk auto-, ill. retrokorrelációs szelvényeket (Anstey és Newman, 1966). Ezek rendkívül gépidőigényes programok, meggyorsításukra már több éve az auto-relais, ill. retro-relais korrelációt használjuk. A műveletek lényege, hogy a korreláció számításánál a függvények *időben eltolt változatai helyett* csupán *a megfelelő adatok előjeleit használjuk,* pl. az

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)\, x(t-\tau)\, dt \tag{29}$$

képlettel definiált *autokorrelációs függvény* helyett az

$$R_{x\,\mathrm{sgn}\,(x)}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)\,\mathrm{sgn}\, x(t-\tau)\, dt \tag{30}$$

auto-relais korrelációs függvényt számítjuk, ahol

$$\mathrm{sgn}\, x = \begin{cases} +1 & \text{ha} \quad x > 0 \\ 0 & \text{ha} \quad x = 0 \\ -1 & \text{ha} \quad x < 0. \end{cases} \tag{31}$$

Hasonlóan járunk el a *retro-relais függvény* számításánál. A (31) képlet előnye, hogy a korreláció számításánál fellépő szorzások összeadásokkal, ill. kivonásokkal helyettesíthetők.

Az 1. ábrán az egzakt módon végrehajtott auto- és retrokorreláció és az auto-relais, ill. retro-relais korreláció összehasonlítása látható (az auto-relais korreláció részletes vizsgálatára l. Ossenberg, 1968 disszertációját).

Mivel az auto-relais és retro-relais szelvények megfelelnek a feldolgozási követelményeknek, megvizsgáltuk, milyen további feldolgozási lépések végezhetők el az adatok előjelével vagy erősen redukált bitszámmal. Az adatkompresszió úgy történt, hogy az eredetileg 14—18 bites fixpontos adatokat *3 értékű lépcsősfüggvénnyel* helyettesítettük, az

$$x \longrightarrow c \cdot \mathrm{sgn}\, x = \begin{cases} +c & \text{ha} \quad x > 0 \\ 0 & \text{ha} \quad x = 0 \\ -c & \text{ha} \quad x < 0, \end{cases} \tag{32}$$

vagy az

$$x \longrightarrow c[u(x-A) - u(-x-A)] = \begin{cases} +c & \text{ha} \quad x \geq A \\ 0 & \text{ha} \quad -A < x < A \\ -c & \text{ha} \quad x \leq -A \end{cases} \tag{33}$$

transzformációk alkalmazásával. A (33) egyenletben $u(x)$ a Heaviside-féle egységugrás függvény, c értékét 2^{11}-nek választottuk. Az A értéke 2 tetszőleges hatványa lehet. A (32) és (33) transzformációkat a továbbiakban *előjelezésnek,* ill. *levágással kombinált előjelezésnek* nevezzük (2. ábra).

A 3. ábrán a teljes dinamikájú anyagon végzett Constant Velocity Scan eredményével hasonlítjuk össze az előjelezett adatokon végzett sebességmeghatározás eredményét. Az előjelezett változaton a nagyobb időkhöz tartozó reflexiók több csatornán, jobban kijelölhetően jelentkeznek, mivel a velocity scan végrehajtása előtti előjelezés nemcsak egy csatornán belül, hanem a csatornák között is kiegyenlíti az amplitúdókat, s így a különböző csatornákon levő jelek azonos energiával szerepelnek az összegezésben.

A sebességanalízis egy más módszerének, a Velocity Spectra eljárásnak előjelkoincidencián alapuló változata COCHRAN (1973) dolgozatában szerepel.

A 4. és 5. ábra azt szemlélteti, hogy a rutin feldolgozás valamennyi lépése, a migráció is, végrehajtható az előjelezett anyagon, anélkül, hogy információt vesztenénk. Az előjeles feldolgozás eredményein nem alkalmaztunk digitális simító vagy felülvágó szűrőt, a megjelenítés széles (0—74 Hz) szűrősávban történt.

Az előjelezett anyagok dekonvolúciójának lehetőségét mutatja a 6. ábra. Az előjelezett csatornákból kiindulva (*1*) retrokorrelációs szelvényt készítettünk (*2*). Visszatérve a kiinduló anyaghoz (*1*), spike-dekonvolúciót hajtottunk végre (*3*), a dekonvolúció eredményét digitális sávszűrővel megszűrtük (*5*), ugyanakkor a spike-dekonvolúció eredményén retrokorrelációs vizsgálatot is végeztünk (*4*), hogy a dekonvolúció hatásosságát megvizsgáljuk.

A következő ábrákkal a „levágással kombinált előjelezés" zajcsökkentő hatására szeretnénk a figyelmet felhívni. A 7. ábrán bemutatott, 18 bit dinamikával feldolgozott, szelvény mélyebb részén a rövid-periódusú többszörösök és a nagyon rossz jel/zaj viszony lehetetlenné tette az esetleges reflexiós szintek vagy szintdarabok és a nem rendezetlen zajból származó jelenségek (diffrakciók stb.) bejelölését.

A jel/zaj viszony javítására a szelvényen először spike-dekonvolúciót végeztünk (8. ábra) és a kapott eredményre, amely maximálisan 14 bit dinamikájú adatokat tartalmazott, kísérletsorozattal meghatároztuk az A „levágási konstans" legmegfelelőbb értékét (9. ábra). Az $A = 2^{10}$-nél kisebb értékek levágása és az előjelezés után a kapott szelvényt digitálisan szűrve jobban értelmezhető anyaghoz jutottunk (10. ábra).

Következtetések

A dolgozat első részében közölt irodalmi áttekintés, a szeizmikus adatok redundanciájára vonatkozó elméleti megfontolásaink és különösen a csökkentett bitszámmal végzett feldolgozások eredményei kétségtelenül bizonyítják, hogy a jelenlegi digitális felvételezés dinamikája jóval nagyobb, mint amit a morfoszeizmikus célok megkövetelnek. A litoszeizmika igényeit figyelembevéve, nem lehet célunk a dinamika csökkentése. A litoszeizmikai célok érdekében, a feldolgozást lebegőpontos aritmetikájú, igen gyors gépeken kell majd végrehajtani, de ilyen gépet gazdaságtalan az elsődleges feldolgozás kis dinamikaigényű folyamatára igénybevenni. Úgy gondoljuk, az optimális megoldást a speciális aritmetikájú, kis bitszámú, gyors és olcsó *predprocesszorok* felhasználása jelentené az elsődleges feldolgozás elvégzésére.

Az a felismerés, hogy az előjelekkel végzett feldolgozás jó minőségű elsődleges stacking szelvényeket eredményez, új fellendülést eredményezhet a terepi bázisra telepített kis számítógépek fejlesztésében.

Г. КОРВИН, И. ПЕТРОВИЧ

ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ МОВ С ПОНИЖЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ РАЗРЯДОВ

В работе описываются исследования, проведенные за последние годы для выяснения вопроса о том, с точностью до какого количества разрядов следует выполнять основные операции обработки сейсмических данных. При этом было обнаружено, что обработка данных с использованием нескольких разрядков — в предельном случае только знака данных — может оказаться равноценной обработке, использующей всю динамику данных.

В историческом обзоре, приведенном в введении, описываются основные направления современной сейсморазведки МОВ: морфосейсмическое (выяснение геометрических условий отражающих горизонтов) и литосейсмическое направление (определение литологических параметров).

После обсуждения требуемой для литосейсмики динамики, приводятся литературные данные, указывающие на то, каким образом отдельные авторы уменьшили динамику данных в процессе стандартной морфологической обработки.

В следующих разделах методами теории информации изучается необходимое содержание разрядов в информации сейсмического канала с учетом решаемой геологической задачи и подробно рассматривается вопрос оптимального квантования и кодирования.

Фактическими примерами подтверждается, что большинство операций производственной обработки данных может быть выполнено на данных, состоящих из пониженного количества разрядов.