Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet
GEOFIZIKAI KÖZLEMÉNYEK
XVIII. kötet. 4. szám.

KÍSÉRTETREFLEXIÓK ELTÁVOLÍTÁSA ÉS A „LOGIKAI DEKONVOLUCIÓ" ELVE

KORVIN GÁBOR

G. KORVIN

ELIMINATION OF GHOST REFLECTIONS AND THE PRINCIPLE OF LOGICAL DEREVERBERATION

The possibilities of detection and elimination of ghost reflections have been examined on synthetic examples. According to Lindsey's well known paper, the reflection coefficient can be determined from the autocorrelation function. However, Lindsey's formula proved inaccurate. In the present paper it is shown that the logical dereverberation principle of J. Morlet, combined with recursive filtering techniques, yields an efficient estimate of the reflection coefficient.

Г. КОРВИН

ПОДАВЛЕНИЕ ОТРАЖЕНИЙ-СПУТНИКОВ И ПРИНЦИП „ЛОГИЧЕСКОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ"

Возможности выделения и подавления отражений-спутников изучались на синтетических примерах. Согласно хорошо известной работе Линдсея коэффициент отражения может быть определен по автокорреляционной функции. Однако выяснено, что формула Линдсея является неточной. В настоящей работе показано, что принцип логической деконволюции, в комплексе с методом рекурсивной фильтрации, позволяет эффективно оценивать величину коэффициента отражения.

A kísértetreflexiók eltávolítása az egycsatornás optimum szűrés egyik legegyszerűbb esete. A kísértetreflexiók jelenlétére a csatorna autokorrelációs függvényéből lehet következtetni, az autokorrelációs függvény első minimumának helye a követési távolságra utal, míg az autokorrelációs függvény 0 toláshoz és a kérdéses első minimumhelyhez tartozó értékeiből a reflexiós koefficiens becsülhető (LINDSEY, 1960). A követési távolság (T) és a reflexiós koefficiens (r) ismeretében viszont a kísértetreflexiót eltávolító szűrő már tervezhető.

A gyakorlatban problémát jelent, hogy a T és r értékek előre nem ismertek, sőt az autokorrelációs függvényből sem határozhatók meg pontosan (MESKÓ–RÁDLER, 1968). A dolgozatban egy eljárást adunk az r reflexiós koefficiens pontos meghatározására (T meghatározására ugyanaz a módszer alkalmazható). A módszer alapgondolata a MORLET (1967) által felvetett „logikai dekonvolucio" elvének általánosítása (hívhatnánk minimumelvnek is). Az alkalmazható eljárások egy- (vagy több-) paraméteres összességéből azon eljárást alkalmazzuk, amelynél az eredménycsatorna minimális energiájú. A megfelelő eljárás kiválasztásához az összes lehetséges eljárást kipróbáljuk. Természetesen Monte Carlo módszerek, vagy bármilyen minimum-kereső algoritmus (akár a nem-lineáris programozás megfelelő eljárása is) alkalmazható.

Az alkalmazott modellek és szűrési eljárás leírása

A kísértetreflexiók felismerését és eltávolításának lehetőségét néhány egyszerű példán vizsgáltuk. Kiinduló adatrendszerünk:

$$g(t) = s(t) - r\,s(t-T) + n(t) \tag{1}$$

alakú volt, ahol $s(t)$ egy, $A-D$ konverterrel a MINSZK – 2 számítógépbe beadott eredeti szeizmikus csatorna, 20 – 100 Hz között ideális sávszűrővel szűrve és $t = 0{,}002$ sec-enként digitalizálva. Kísérleteinkben az r reflexiós koefficiens értékét 0,7-nek választottuk, míg a (kétszeres félidőt jelképező) $T = m.\Delta t$ időkésés értéke 10.0,002 – 25.0,002 sec között változott. Az n(t) zajt számítógéppel generáltuk, az

$$n(t) = n(k\cdot\Delta t) = \pm C \tag{2}$$

képlet szerint (C alkalmasan választott konstans). (2)-ben az előjel attól függ, hogy $s(k) - rs(k-m)$ lebegővesszős ábrázolásában a bitek száma páros, vagy páratlan-e. A (2) alakú zaj generálásának az az előnye, hogy a$\{\pm 1\}$ ún. bináris sorozatok autokorrelációs függvényei kombinatorikus eszközökkel aránylag jól kezelhetők (a véletlenszerűen generált $\{\pm 1\}$ sorozatok, ideális felülvágó szűrővel szűrve jó közelítéssel fehér zajnak tekinthetők. Ez az ún. Martin-zaj (l. pl. Cassand – Lavergne, 1966).

A kísértetreflexiók eltávolítására a rekurziv szűrés (Shanks, 1967) módszerét alkalmaztuk. Az (1) összefüggésből nyerhető rekurziós egyenlet

$$\left.\begin{aligned} x(t) &= g(t) + rx(t-T) \qquad (t \geq 0) \\ x(t) &= 0 \qquad (t < 0) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

ahol $x(t)$ a szűrt csatorna. Az 1. ábrán látható a (3) rekurziv szűrés eredménye, $T = 20\cdot 0{,}002$ sec, $r = 0{,}7$-nél.

1. ábra. Kísértetreflexiók eltávolítása rekurziv szűréssel

Fig. 1 Elimination of ghosts by recursive filtering

Фиг. 1. Подавление отражений-спутников рекурсивной фильтрацией

Megfigyelhető, hogy a (3) rekurziós képletben nem az $s(t)$ jel, hanem csak ennek egy $x(t)$ közelítése szerepel. Ha nincs zaj a modellben, azaz $n(t) \equiv 0$; $x(t)$ természetesen megegyezik $s(t)$-vel. Ellenkező esetben a rekurziv szűrő a zajra is hat, az

$$N(t) = n(t) + N(t-T) \tag{4}$$

képlet szerint, ahol $n(t)$ eredeti, $N(t)$ pedig a rekurziv szűrő kimenetén jelentkező zaj. A (2) felhasználásával

$$|N(t)| \leq C + r|N(t-T)| \leq C + rC + r^2|N(t-2T)| \leq C(1+r+r^2+\ldots) = \frac{C}{1-r}$$

Ebből is látható a rekurziv szűrő használatának egy veszélye. Mivel itt nem célunk a rekurziv szűrők elméletének vizsgálata, e kérdéssel nem kívánunk részletesebben foglalkozni.

A logikai dekonvolució elve

A (4) rekurziv szűrés alkalmazásánál nehézséget jelent, hogy r értéke a gyakorlatban nem ismeretes. Szeretnénk itt felhívni a figyelmet egy új elgondolásra, amelyet J. Morlet vetett fel 1967-i előadásában. Az eljárást, amelyet „logikai dekonvoluciónak" (logical dereverberation) nevez, az elemi Backus operátorok meghatározására vezeti be olymódon, hogy azt az operátort tekinti optimálisnak, amelynek alkalmazása a legkisebb összenergiajú csatornát eredményezi. A „logikai dekonvolució" elve az r reflexiós koefficiens meghatározására a következőképpen alkalmazható:

Valódi reflexiós koefficiensnek azt az r, $0 \leqq r \leqq 1$ értéket fogadjuk el, amelyre az $I = \Sigma x^2(k)$ minimális, ahol x a (4) rekurzióval definiált csatorna. Másszóval „rossz" reflexiós koefficienssel végrehajtott szűrés mindig nagyobb összenergiájú csatornát eredményez, mintha a jó reflexiós együtthatót használjuk.

Hogy a logikai dekonvolució elvét plauzibilissé tegyük, gondoljuk meg, hogy a kísértetreflexiók jelenléte általában az összenergiát növeli (és így várható hogy az az eljárás fog minimális energiájú csatornát adni, amely tökéletesen eltávolítja a kísértetreflexiókat). Pontosabban, ha

$$g(t) = s(t) - \alpha s(t-T)$$

akkor az

$$\int [s(t) - \alpha s(t-T)]^2 \, dt \geq \int s^2(t) \, dt \tag{5}$$

egyenlőtlenség, elvégezve a négyzetreemelést,

$$\alpha^2 \int s^2(t-T) \geq 2\alpha \int s(t)s(t-T) \, dt$$

alakban írható, vagyis, bevezetve az $s(t)$ jel autokorrelációs függvényére az $R_s(\tau)$ jelölést:

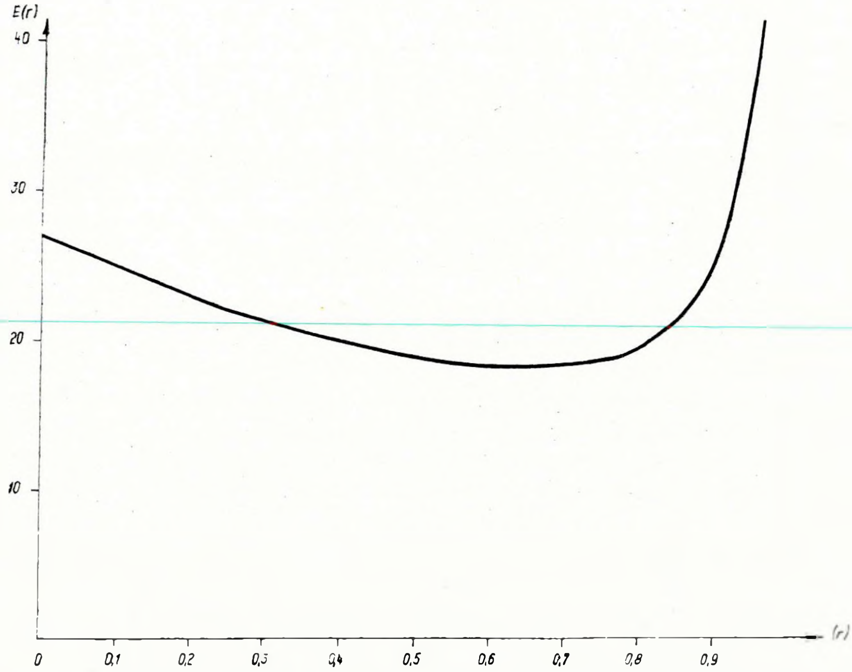
Az (5) reláció mindig teljesül, valahányszor

$$\frac{R_s(T)}{R_s(0)} \leq \frac{\alpha}{2}. \tag{6}$$

Térjünk most vissza a logikai dekonvolució elvének alkalmazásához.

A 2. ábrán az (1) csatorna különböző r együtthatókkal való rekurziv szűrése utáni energiaértékei láthatók. Az energia minimuma valóban $r^* = r = 0{,}7$ értéknél jelentkezik. Figyeljük meg, hogy $r^* \to 1$-nél az energia rohamosan nőni kezd ($r^* > 1$-nél a rekurzió instabillá válik).

A (*) állítás exakt bizonyítása nehéznek látszik. Tekintsünk el a zaj jelenlététől és tegyük fel, hogy a ghost-os csatorna



2. ábra. A szűrt csatorna energiája a feltételezett reflexiós koefficiens függvényében (a tényleges reflexiós koefficiens $r = 0{,}7$)

Fig. 2 The energy of the filtered channel as a function of the reflexion coefficient assumed (actual reflexion coefficient $r = 0{,}7$)

Фиг. 2. Зависимость энергии фильтруемой трассы от предполагаемого коэффициента отражения (эффективная величина коэффициента отражения $\gamma = 0{,}7$)

$$s(t) - \alpha s(t-T) \tag{7}$$

alakban áll elő, ahol $O < \alpha < 1$ a valódi reflexiós koefficines. Ha rekurziv szűrést az r, $O < r < 1$ reflexiós együtthatóval végezzük, a szűrt csatorna energiáját

$$E(r) = \sum_n / s_n + \beta s_{n-T} + r\beta s_{n-2T} + r^2\beta s_{n-3T} + \dots \tag{8}$$

adja meg, ahol bevezettük a $\beta = r - \alpha$ jelölést [a (8) egyenlet levezetését a függelékben adjuk].

A szereplő idősorok stacionáritását feltételezve, $E_{(r)} = R_0(1 + \beta^2 + r^2\beta^2 + \dots) + 2\beta(R_T + rR_{2T} + r^2R_{3T} + \dots) + 2\beta^2(rR_T + r^2R_{2T} + r^3 R_{3T} + \dots) + 2\beta^2r^2(rR_T + r^2R_{2T} + r^3R_{3T} + \dots) + \dots$

ahol $R_0 = R_S(O)$; $R_T = R_S(T)$; az s_n jelsorozat autokorrelációs függvényének értékei. Bevezetve még a

$$\varrho = \varrho(r) = rR_T + r^2 R_{2T} + r^3R_{3T} + \dots \tag{9}$$

függvényt, az energia r-függésének

$$E(r) = R_0 + \frac{\beta^2}{1-r^2}\,[R_0 + 2\varrho(r)] + \frac{2\beta\varrho(r)}{r} \tag{10}$$

alakjához jutunk.

(10)-ből triviálisan adódik, hogy ha $R_T = R_{2T} = R_{3T} \ldots = 0$ akkor

$$E(\alpha) = R_0 = \min_{0 \le r \le 1} E(r) \tag{11}$$

Egyéb esetekben $\varrho\,(r)$ az r változónak bonyolult függvénye és az $E(\alpha) = \min E(r)$ reláció nem látható be közvetlenül (esetleg nem is igaz!). A $\varrho\,(r)$-re adható becslésekből és a tanulmányozott modellekből úgy látjuk, hogy a gyakorlatban előforduló esetekben a logikai dekonvolúció elve alkalmazható a kísértetreflexiót jellemző reflexiós koefficiens becslésére. Az r reflexiós koefficienssel szűrt csatorna $E(r)$ energiájának, az exakt reflexiós koefficiens közelében minimuma van. A minimumot adó r-nek és az exakt reflexiós együtthatónak az eltérése általában kisebb, mint a LINDSEY-féle

$$\frac{R(0)}{R(T)} \approx \frac{1+r^2}{-r}$$

képletből számított r hibája.

Megemlítjük még, hogy az időkésés sem határozható meg pontosan az autokorrelációs függvényből. Így a minimális energia számítása a (4)-beli r és T variálásával is összeköthető. Eddigi számításaink szerint az $E(r,\, T)$ energiának az exakt $(r,\, T)$ közelében minimuma van. A logikai dekonvolució elvének teljes igazolásához további számítások szükségesek.

Következtetések

A digitális szeizmika legtöbb, analitikus formában megfogalmazható eljárása (dekonvolució, dinamikus korreláció stb.) súlyos feltevéseken alapszik; az eljárások lényeges paramétereit csak statisztikus becslésekkel lehet megadni. A számítógépek nagy műveleti sebessége lehetővé teszi a lényeges paraméterek próbálgatással (vagy más, szisztematikus keresési eljárással) való meghatározását. Az eljárásokat a szóbajövő paraméterekkel alkalmazva, azt a paramétert választjuk a végleges feldolgozáshoz, amelyre egy — az eredménycsatornákból számítható — jól definiált függvénynek (pl. energia, amplitúdó abszolút értékek átlaga, stb.) szélsőértéke van. Az optimalizálandó függvényt mindig a probléma fizikai jellegének megfelelően kell választani.

A fenti általános elv a MORLET által bevezetett „logikai dekonvolució" általánosításának tekinthető. (Megfigyelhető, hogy a sebességanalizis GAROTTA — MICHON féle módszere is hasonló elgondoláson alapszik!). Dolgozatunkban az általános elvet a kísértetreflexiók szűrésére (speciálisan a reflexiós koefficiens meghatározására) alkalmaztuk.

Függelék

A (8) összefüggés bizonyítása

A rekurziv összefüggés szerint

$$x(t) = g(t) + rx(t - T)$$

ahol r az alkalmazott reflexiós együttható. Alkalmazva a rekurziót $x\,(t-T)$-re is:

$$x(t) = g(t) + rg(t - T) + r^2x(t-2T),$$

végül a rekurzió egymás utáni alkalmazásaival az

$$x(t) = \sum_{j=0}^{\infty} r^j g(t-jT) \tag{11}$$

összefüggéshez jutunk.

A valódi reflexiós együtthatót α-val jelölve

$$g(t) = s(t) - \alpha s(t - T),$$

ezt (11)-be helyettesítve

$$x(t) = \sum_{j=1}^{\infty} r^j[s(t-jT) - \alpha s(t-(j+1)T)] =$$

$$= \sum_{j=0}^{\infty} r^j s(t-jT) - \alpha \sum_{j=0}^{\infty} r^j s[t(j+1)T] =$$

$$= s(t) + r\sum_{j=1}^{\infty} r^{j-1}s(t-jT) - \alpha \sum_{j=1}^{\infty} r^{j-1}s(t-jT) = s(t) + (r-\alpha)\sum_{j=1}^{\infty} r^{j-1}s(t-jT), \tag{12}$$

vagyis bevezetve a valódi és feltételezett reflexiós együtthatók különbségére a $\beta = r - \alpha$ jelölést, az $E(r)$ energiára valóban a (8) összefüggés adódik.

*

A levezetés itt közölt változata Zilahi Sebess Lászlótól származik.

IRODALOM

Cassand, J. – Lavergne, M., 1966: L'émission sismique par vibrateurs. A "Le filtrage en sismique" kötetben, Publication de l'Institut Français du Pétrole, Paris Vol. I. pp. 211 – 234.

Lindsey, J., 1960: Elimination of seismic ghost reflections by means of a linear filter. Geophysics, Vol. XXV. pp. 130 – 140.

Meskó A. – Rádler B., 1968: Modellszámítások alkalmazása a szeizmikus adatfeldolgozás és értelmezés előkészítésében. Magyar Geofizika, IX. 4 – 5.

Morlet, J., 1967: Three stages in seismic data processing: analog, digital and logical methods. Abstract of paper presented at the 29th meeting of the European Association of Exploration Geophysicists Stockholm 7th – 9th June, 1967. Geophysical Prospecting. Vol. 15, No. 3 pp. 540 – 541.

Shanks, J. L., 1967: Recursion filters for digital processing. Geophysics, Vol. XXXII. No 1 pp. 33 – 51.