

複数の符号の並列伝送による地中弾性波の多点間伝搬特性の測定ための
符号構成法

Source Code Construction for Multi-Channel Seismic Survey

by Parallel Transmission of Source Codes

○棚田 嘉博・井口 正人・筒井 智樹・中道 治久

○Yoshihiro TANADA, Masato IGUCHI, Tomoki TSUTSUI I, Haruhisa NAKAMICHI

Multiple transmittances of underground elastic wave channels from transmitters to receivers are detected by using orthogonal pseudo-noise codes. The codes constructed from orthogonal real-valued pseudo-noise sequences and a small-magnitude real-valued pseudo-noise sequence give zero-cross-correlation and impulsive autocorrelation in a range. The performance of this method is verified by the simulation that for an underground reflection model, two signals sent to a receiver from separate positions are detected as pulses independently by the respective object codes, in the existence of noise. In a fundamental experiment, a water-speaker and a hydrophone have operated within water-filled vessels buried in the ground and the signals have been digitally controlled and processed.

1. はじめに

擬似雑音符号を伝搬路に送信し受信信号と擬似雑音符号との相関関数を求めれば伝搬路のインパルス応答が求まり、もし、異なる複数の符号で直交しているものがあれば、送受信の装置を複数個用意し、複数の送信点、複数の受信点の間の伝搬特性を同時に送受信でき、測定が効率的に行える。

本報告では、複数個の実数直交擬似雑音符号を構成し、地中弾性波の反射伝搬路で同時送信した信号が或る受信点で干渉なく検出されることシミュレーションで示す。また基礎実験を紹介する。

2. 直交擬似雑音符号による多点間符号伝送

送信点 S_ℓ ; $\ell = 1, 2, \dots, L$ から信号 $s_\ell(t) = E_\ell c_\ell(t)$ を送出し受信点 R_m ; $m = 1, 2, \dots, M$ で信号 $r_m(t)$ を受信するとき、送信点 S_ℓ から受信点 R_m に至るインパルス応答を $h_{m,\ell}(t)$ として受信点 R_m における受信信号 $r_m(t)$ は次式で表せる。

$$r_m(t) = h_{m,1}(t) * s_1(t) + \dots + h_{m,\ell}(t) * s_\ell(t) + \dots + h_{m,L}(t) * s_L(t) \quad (1)$$

$$h_{m,\ell}(t) * s_\ell(t) = \int_0^t h_{m,\ell}(t_0) s_\ell(t - t_0) dt_0 \quad (2)$$

符号 $c_\ell(t)$ と符号 $c_{\ell'}(t)$ の相互相関関数に直交関係

$$\rho_{\ell,\ell'}(t') = \frac{1}{T} \int_0^T c_\ell(t) c_{\ell'}(t - t') dt = \begin{cases} \delta(t'); & \ell = \ell' \\ 0; & \ell \neq \ell' \end{cases} \quad (3)$$

が成立すれば、 $r_m(t)$ と $c_\ell(t)$ の相関関数は

$$\frac{1}{T} \int_0^T r_m(t) c_\ell(t - t') = E_\ell h_{m,\ell}(t') \quad (4)$$

となり、 ℓ 番目の送信点から m 番目の受信点への

インパルス応答が求まる。なお、直交関係は一定のシフト範囲 $0 \leq t' < T'$ で成立するものとする。

3. 実数直交擬似雑音系列

周期 N_1 、系列番号 ℓ 、順序変数 i の実数擬似雑音系列 $\{a_{\ell,i}\}$ ($i = 0, 1, \dots, N_1 - 1, \ell = 1, 2, \dots, L$) は

$$a_{\ell,i} = \frac{1}{\sqrt{N_1}} \sum_{k=0}^{N_1-1} \cos \left\{ \frac{2\pi}{N_1} (ki + \ell k^3) \right\} \quad (5)$$

で表され、 N_1 が素数のとき $|a_{\ell,i}| \leq 2$ が成り立つ。一般に、べき乗数3 が $N_1 - 1$ と互いに素のとき $a_{\ell,0} = \sum_{i=0}^{N_1-1} e^{j2\pi\ell k^3/N_1} = 0$ となる。このような素数は $N_1 = 5, 11, 17, 23, 29, 41, \dots$ である。二つの系列 $\{a_{\ell,i}\}, \{a_{\ell',i}\}$ の相互相関関数は

$$\rho_{\ell,\ell',i'} = \frac{1}{N_1} \sum_{i=0}^{N_1-1} a_{\ell,i} a_{\ell',i-i'} = a_{\ell-\ell',i'}/\sqrt{N_1} \quad (6)$$

で表される。 $\rho_{\ell,\ell',0} = a_{\ell-\ell',0}/\sqrt{N_1} = 0$ となるので、 $\{a_{\ell,i}\}$ ($\ell = 1, 2, \dots, L$) の系列は直交系を成す。

一方、周期が $N_2 = 2^n - 1$ ($n = 2, 3, 4, \dots$)、最大絶対値が1に近い擬似雑音系列 $\{b_i\}$

$$b_i = \frac{\sqrt{N_2}}{\sqrt{N_2+1}} \left(\frac{1}{\sqrt{N_2+1+1}} + \xi_i \right) \quad (7)$$

を導入する。ここで、 $\{\xi_i; i = 0, 1, \dots, N_2 - 1\}$ は ± 1 を取る M 系列で、 $\sum_i \xi_i = 1$ とする。

N_1, N_2 が互いに素のとき、0 値を追加した周期 $N = N_1 N_2$ の系列 $\tilde{a}_{\ell,i} = \sum_{i_1=0}^{N_1-1} \sqrt{N_2} a_{\ell,i_1} \delta_{i, N_2 i_1}$ と $\tilde{b}_i = \sum_{i_2=0}^{N_2-1} \sqrt{N_1} b_{i_2} \delta_{i, N_1 i_2}$ を畳み込んで、

$$c_{\ell,i} = \sum_{i_1=0}^{N_1-1} \sum_{i_2=0}^{N_2-1} a_{\ell,i_1} b_{i_2} \delta_{i, N_1 i_2 + N_2 i_1} \quad (8)$$

を得る。合成された系列 $\{c_{\ell,i}\}, \{c_{\ell',i}\}$ の相関関数は

$$\psi_{\ell,\ell',i'} = \sum_{i_1=0}^{N_1-1} \rho_{\ell,\ell',i_1} \delta_{i',N_2 i_1} \quad (9)$$

で表され、 $\ell \neq \ell'$ に対し、シフト $0 \leq i' \leq N_2 - 1$ において 0 になる。

4. 反射伝搬のシミュレーション

送信点 S_1 , 受信点 R_1, R_2, R_3, R_4 , 送信点 S_2 が地表に 4[m] 間隔で並び、深さ 5[m] に地表と平行な反射面がある図 1 の伝搬モデルにおいて、 S_1, S_2 から同時に信号 $E_1 c_1(t), E_2 c_2(t)$ を送信し、受信点 R_1 で伝搬特性 $h_{1,1}(t'), h_{1,2}(t')$ を検出する場合を想定する。地中弾性波速度は $v = 300$ [m/s], 伝搬距離 d [m] での強度伝達率は $w = 10^{-d/10}$ とする。このとき、 S_1, R_1 間で距離 $d_1 \cong 10.8$ [m], 伝達率は $w_1 \cong 0.0832$, 伝搬時間 $t_1 \cong 36.0$ [ms], S_2, R_1 間で距離 $d_2 \cong 18.8$ [m], 伝達率 $w_2 \cong 0.0132$, 伝搬時間 $t_2 \cong 62.7$ [ms] となる。送信信号のパワーを共に 1 [W] とし、 $E_1 = E_2 = 1[\sqrt{W}]$ とおくと、送信信号は距離 d_1, d_2 で $(E_1 w_1)^2 \cong 0.00692$ [W], $(E_2 w_2)^2 \cong 0.000174$ [W] と見込まれるので、受信点 R_1 での雑音のパワーを $\sigma^2 = 1$ [mW] とする。そこで $N_1 = 5$ の系列 $\{a_{1,i}\}, \{a_{2,i}\}$ と $N_2 = 127$ の系列 $\{b_i\}$ から $N = N_1 N_2 = 635$ の系列 $\{c_{1,i}\}, \{c_{2,i}\}$ を作る。周波数 $f_0 = 160$ [Hz] の正弦波の 1 周期 $\Delta t = 1/f_0 = 6.25$ [ms] での搬送を想定し、 $\tau = t/\Delta t$ として符号波形を $C_1(\tau), C_2(\tau)$ と置き、 $\tau_1 = t_1/\Delta t \cong 6$, $\tau_2 = t_2/\Delta t \cong 10$ で遅延、減衰した信号 $w_1 C_1(\tau - \tau_1), w_2 C_2(\tau - \tau_2)$ の検出を試みる。なお、正弦波の変復調過程は省略する。図 2 に 635 チップの符号波形 $C_1(\tau)$ の最初の 256 チップを示す。図 3 に受信点 R_1 での雑音波形と信号 $w_1 C_1(\tau - \tau_1), w_2 C_2(\tau - \tau_2)$ の混在波形を示す。図 4, 図 5 に参照符号 $C_1(\tau), C_2(\tau)$ で検出した $h_{1,1}(t'), h_{1,2}(t')$ に相当する波形 $H_{1,1}(\tau'), H_{1,2}(\tau') (\tau' = t'/\Delta t)$ を示す。受信入力で $w_1^2/\sigma^2 = 6.92$ [8.4dB], $w_2^2/\sigma^2 = 0.174$ [-7.5dB] であった S/N 電力比は処理利得 635 [28.03dB] によって、それぞれ $6.92 \times 635 = 4394.2$ [36.4dB], $0.174 \times 635 = 110.49$ [20.43dB] に向上している。

5. 基礎実験

正負の極性で変化する電氣的信号と地中の弾性波信号との伝達を円滑に行うために、水を媒体とする方法を採用した。送受信部には土中にプラスチック容器を埋め容器に水を満たし、水、容器、土の間の音響的結合を行う。駆動源は容器に吊るし

た水中スピーカ、センサは容器に置いたハイドロフォンとした。基礎実験では符号の地中伝搬を確認するために、長さ 11822 の有限長系列(Huffman 系列)を用い、速やかな計測のために比較的高い周波数 $f_0 = 200$ [Hz] の搬送波を用いた。実験現場は桜島黒神の表層が火山灰土で覆われ、表層から約 5[m] の深さに溶岩層が存在する場所で、表層水平方向 30[m] での実験、溶岩層近くまで埋めたビニルパイプの間で水平方向約 34[m], 52[m] での実験を行い、約 2 [dB/m] の減衰特性、約 300 [m/s] の音速を得ており、これらの結果はシミュレーションに利用している。

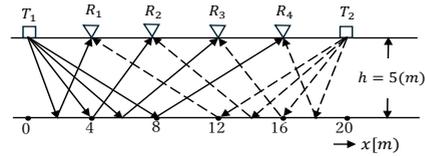


図 1 反射伝搬モデル

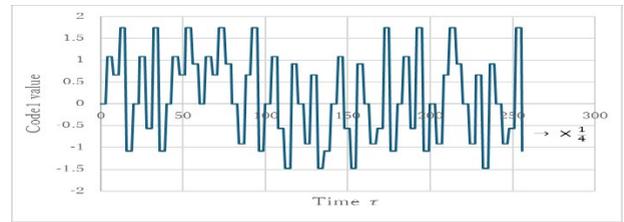


図 2 符号波形 $C_1(\tau)$

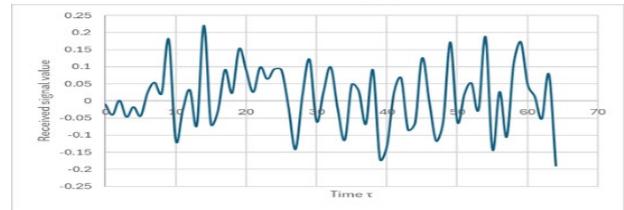


図 3 R_1 での受信信号と雑音の和の波形

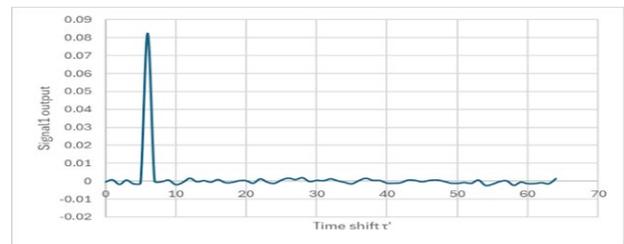


図 4 $H_{1,1}(\tau')$ の検出波形

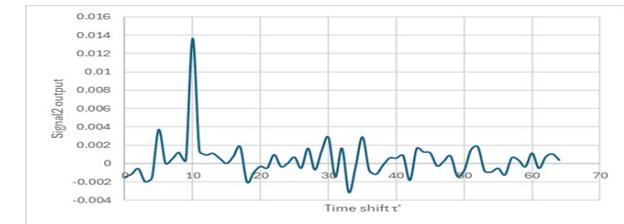


図 5 $H_{1,2}(\tau')$ の検出波形