

17th SYMPOSIUM ON HYDROACOUSTICS

Jurata May 23-26, 2000



DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE NAMIARÓW CELÓW AKUSTYCZNYCH ZA POMOCĄ MODELU ANTENY PASYWNEJ

H. Chodkiewicz, S. Henclik
OBR Centrum Techniki Morskiej
ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia, Polska

A passive linear array consisting of eight hydrophones was tested in the air. The measurements were done in a laboratory hall as well as outdoors. Strongly coherent scenario due to multipath propagation was involved in the first case. The location angles of two acoustic sources were determined with the use of different methods. Conventional beamforming (CBF), minimum variance beamforming (MVB) and MUSIC algorithm were applied as localization techniques. The influence of forward-backward spatial smoothing for the results was examined as well. The area of multiple sources passive direction of arrival (DOA) estimation has been of great interest for many years. However, not many papers deal with field experiments. Testing an array of hydrophones in the air, instead of water, is very convenient. The length-scale contraction due to lower acoustic velocity is one of the advantages.

WPROWADZENIE

Doświadczalna weryfikacja algorytmów namiaru jest niezbędnym etapem uruchomienia oprogramowania do lokalizacji źródeł hydroakustycznych. Aczkolwiek szczegółowe, podwodne pomiary anteny hydrofonów są niezbędne, z oczywistych względów badania modelu takiej anteny w powietrzu są łatwiejsze. Badania takie prowadzone dla sztucznych źródeł mają jeszcze jedną przewagę, związaną ze znacznym zmniejszeniem metrycznej skali eksperymentu wynikającym z cztero-i-pół-krotnie mniejszej prędkości dźwięku w powietrzu niż w wodzie. W takim samym stosunku maleją więc zarówno rozmiary anteny liniowej jak też odległość strefy dalekiej, w której należy umieścić źródło dźwięku.

W Zakładzie Wibroakustyki OBR CTM wykonano badania doświadczalne w zakresie wyznaczania namiarów źródeł szumów akustycznych za pomocą modelu liniowej anteny pasywnej. Badana antena składała się z ośmiu ($N=8$) hydrofonów umieszczonych w jednakowych odstępach $d=0.3$ m. Dla prędkości dźwięku w powietrzu wynoszącej $c=330$ m/s oznacza to maksymalną częstotliwość przetwarzania wąskopasmowego określoną z warunku Nyquista [2,8] $f_{\max}=550$ Hz. Maksymalna szerokość pasma przetwarzania Δf_{\max} oraz minimalna odległość r , dla której spełniony jest warunek strefy dalekiej dane są odpowiednio wzorami (1) i (2) [1,2].

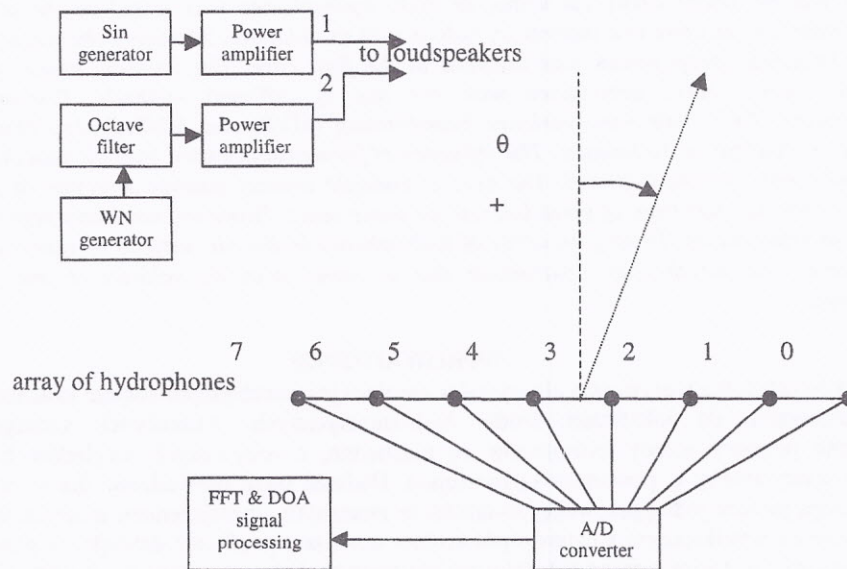
$$\Delta f_{\max} = f_{\max} \cdot \frac{0.2}{N-1} = 15.7 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$r \geq 14.7m = (N-1)^2 d \geq \frac{f}{f_{\max}} \cdot (N-1)^2 d \quad (2)$$

gdzie f oznacza aktualną częstotliwość przetwarzania ($f < f_{\max}$).

1. OPIS POMIARÓW

Wykonano pomiary w hali laboratorium oraz na zewnątrz [1]. Źródłem sygnałów były głośniki zasilane szumem białym filtrowanym oktawaowo w paśmie 400 Hz (282Hz÷564Hz) lub sygnałem sinusoidalnym o częstotliwościach 400Hz albo 514Hz. Odległość głośników od anteny wynosiła 17m lub 18m. Kąt namiaru (DOA) mierzony względem symetralnej anteny uważany był za dodatni, gdy źródło znajdowało się po tej stronie symetralnej co hydrofon o numerze 0 (stosowano numerację 0÷7). Podczas pomiarów z jednym źródłem przebadano trzy konfiguracje ustawienia źródła, $\theta=0^\circ$, $\theta=-30^\circ$, $\theta=-45^\circ$. Pomiary z dwoma źródłami wykonano przy ustawieniu źródeł $\theta_1=-13^\circ$, $\theta_2=13^\circ$. Uproszczony schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego do doświadczalnego wyznaczania kierunków dotarcia sygnałów akustycznych za pomocą ośmioelementowej anteny hydrofonów.

Fig.1. The scheme of the measuring station for determining the direction of arrival (DOA) of acoustic signals with the use of eight-element array of hydrophones.

Generowano sygnały o stosunkowo wysokim poziomie mocy. Przy szumach tła rzędu 60 dB (pomiar szerokopasmowy wg skali A) w hali laboratorium i 65 dB na zewnątrz, poziom sygnału wynosił 90÷100 dB (silna fala stojąca!) w hali i około 85 dB na zewnątrz. Sygnały rejestrowano na specjalizowanym komputerze wyposażonym w kartę pomiarową z przetwornikiem A/C. Stosowano częstotliwość próbkowania 4100 lub 3200 Hz. Na ogół rejestrowano przebiegi o czasie trwania 6 sekund. FFT wykonywano z zastosowaniem okna Hamminga dla ciągów 0.5 sekundowych uzyskując szerokość prążków 2Hz.

2. STOSOWANE ALGORYTMY PRZETWARZANIA

Uzyskane za pomocą FFT zespolone amplitudy sygnału były punktem wyjścia dalszych zaawansowanych algorytmów przetwarzania mających na celu wyznaczenie kierunków docierających sygnałów. Do przetwarzania zastosowano następujące metody spektralne [2,6] – beamforming konwencjonalny (CBF – *conventional beamforming*), algorytm Capona zwany również beamformingiem o minimalnej wariancji (MVB – *minimum variance beamforming*) oraz algorytm MUSIC (*multiple signal classification*) [7]. W odniesieniu do dwóch ostatnich metod, w celu uzyskania dekorelacji sygnałów, stosowano opcjonalnie przetwarzanie wstępne w postaci dwukierunkowego wygładzania przestrzennego (FBSS – *forward-backward spatial smoothing*) [3,10]. Podstawą wszystkich algorytmów była estymata zespolonej macierzy korelacji \mathbf{R} obliczana wg wzoru (3), w którym \mathbf{x} jest kolumnowym wektorem zespolonych amplitud w chwili t , K ilością *snapshot'ów*, a indeks H oznacza hermitowskie sprzężenie.

$$\mathbf{R} = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^K \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) \quad (3)$$

Spektrum mocy algorytmem CBF obliczano wg wzoru (4) (z dokładnością do czynnika normalizacyjnego), w którym w_i są współczynnikami ważenia amplitudy (stosowano wagi Hamminga), a częstość przestrzenna ϕ dana jest wzorem (5).

$$P_{\text{CBF}}(\theta) = \sum_{m,k=0}^{N-1} w_m w_k R_{mk} \exp[j(m-k)\phi] \quad (4)$$

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (5)$$

Spektrum mocy algorytmem MVB obliczano wg wzoru (6). Wektor kierujący $\mathbf{a}(\theta)$ dany jest wzorem (7). Iloczyn $\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}$ wyznaczano za pomocą rozkładu Cholesky'ego [6] macierzy korelacji.

$$P_{\text{MVB}}(\theta) = [\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)]^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp(-j\phi), \dots, \exp(-j(N-1)\phi)]^T \quad (7)$$

Uśrednianie dwukierunkowe (FB) macierzy korelacji realizowano wg wzoru (8), w którym \mathbf{J} jest macierzą wymiany ($J_{km} = \delta_{k+m+1, N}$), a wygładzanie przestrzenne rzędu L wg wzoru (9). Po wygładzaniu przestrzennym wymiar macierzy korelacji maleje z $N \times N$ do $(N-L) \times (N-L)$.

$$\mathbf{R}^{(\text{FB})} = \frac{1}{2} (\mathbf{R} + \mathbf{J} \mathbf{R}^* \mathbf{J}) \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{km}^{(\text{SS})} = \frac{1}{L+1} \sum_{i=0}^L R_{k+i, m+i} \quad (9)$$

Spektrum MUSIC wyznaczano wg wzoru (10), w którym Π_n jest macierzą rzutu ortogonalnego na estymowaną na podstawie pomiarów podprzestrzeń szumów, rozpinaną przez $N-M$ (M jest ilością źródeł) wektorów własnych macierzy korelacji o najmniejszych wartościach własnych (wektorów szumów) [2,7].

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \|\Pi_n \mathbf{a}(\theta)\|^{-2} \quad (10)$$

Rozkład własny zespolonej macierzy korelacji realizowano po przejściu do równoważnego, rzeczywistego [4], symetrycznego zagadnienia własnego, algorytmem Jacoby'ego [5]. Ilość M źródeł określano, badając rozkład wartości własnych metodą MDL (lub AIC) [9].

3. REZULTATY LOKALIZACJI CELÓW

Do realizacji przedstawionych powyżej algorytmów wykonano i uruchomiono odpowiednie oprogramowanie (program PASANT) [4]. Za pomocą tego programu przetworzono rezultaty wykonanych pomiarów. Wybrane wyniki wyznaczania namiarów przedstawiono na rys.2 i 3. W opisie wykresów oznaczenie FB2 obok nazwy algorytmu oznacza uśrednianie dwukierunkowe i wygładzanie przestrzenne rzędu 2. Na wykresach przestrzennego spektrum mocy spektra CBF i MVB zostały wyznaczone w typowej dla powietrza akustycznej skali decybelowej (względem $20 \mu\text{Pa}$ i 1Hz). Ponieważ miarą spektrum MUSIC jest stopień ortogonalności wektora kierującego do podprzestrzeni szumów odpowiednia skala była dostosowana do wygody prezentacji (odpowiednio przesunięta).

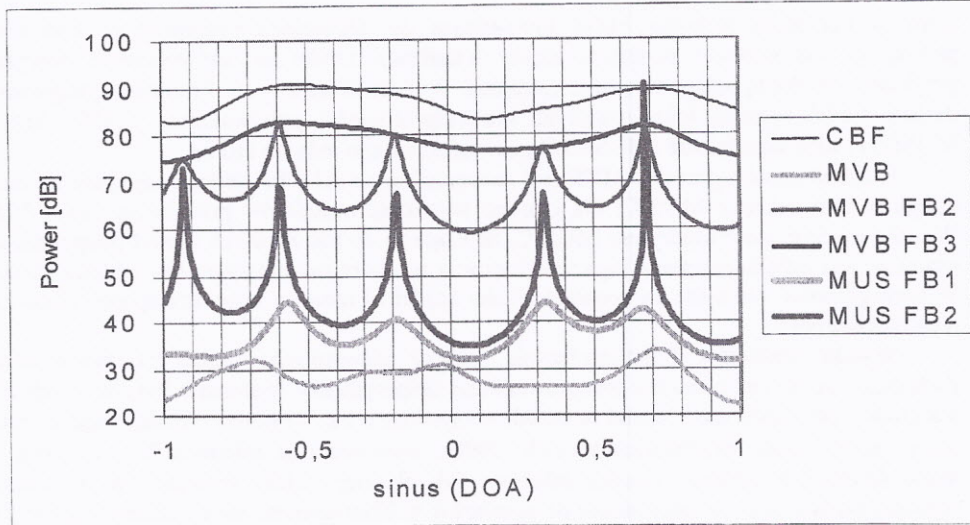
Na rys.2 zaprezentowano spektrum przestrzenne anteny dla pomiarów w laboratorium, w przypadku emisji pojedynczego sygnału o częstotliwości 514 Hz pod kątem -45° względem anteny (antena była obrócona o 45° względem ścian). Ponieważ za anteną oraz z obu jej stron znajdowały się bardzo dobrze odbijające ściany laboratorium na wykresach można zaobserwować szereg sygnałów odbitych. Krzywe o największej liczbie maksimów wyznaczają kierunki -67° , -37° , -11° , 18° , 44° . Ze względu na złożone warunki odbicia trudno jednoznacznie ocenić poprawność wykonanych namiarów (usytuowanie stanowiska daje powody do przypuszczeń, że dwa najsilniejsze sygnały powinny padać pod kątem $+45^\circ$ i -45°). Na rys.3 przedstawiono lokalizację dwóch źródeł sygnału na podstawie pomiarów na wolnym powietrzu - szerokopasmowego szumu oraz sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 514Hz i większym, o około 10 dB , poziomie mocy. Wąskopasmową lokalizację wykonano dla częstotliwości odpowiadającej częstotliwości sygnału sinusoidalnego, jak również dla pasma znacznie niższego (315Hz). W pierwszym przypadku lokalizuje się oba sygnały - mocniejszy sygnał sinusoidalny ($\sin(\text{DOA}) \cong 0.2$) oraz szum ($\sin(\text{DOA}) \cong 0.2$), w drugim natomiast (krzywa MUSFB6 oraz MVBFB2) widać tylko źródło szumów. Z rys.3 widać, że algorytm CBF nie daje szansy zlokalizowania słabszego źródła. Metody MVB i MUSIC stwarzają takie możliwości choć przetwarzania wstępne sygnału musi być w tym przypadku bardzo starannie dobrane.

4. DYSKUSJA WYNIKÓW

Niewątpliwie znaczny wpływ na rezultaty przetwarzania i lokalizacji celów miał fakt małej ilości przetworników anteny, a co za tym słabej rozdzielczości. Widać to zwłaszcza w odniesieniu do algorytmu CBF, którego maksima są słabe (kilka do kilkunastu dB) i szerokie. Ze słabej rozdzielczości CBF wynika niemożność rozróżnienia sygnałów odległych nawet o więcej niż 20° , zwłaszcza jeśli różnią się one poziomem mocy. Mała ilość hydrofonów zmniejsza też efektywność algorytmów MVB i MUSIC. Nie widać co prawda w tym przypadku tak wyraźnego spadku rozdzielczości, rosną jednakże błędy namiarów, a także zaczyna odgrywać rolę ograniczenie rzędu wygładzania przestrzennego L , w związku z koniecznością spełnienia zależności (11) [8,10].

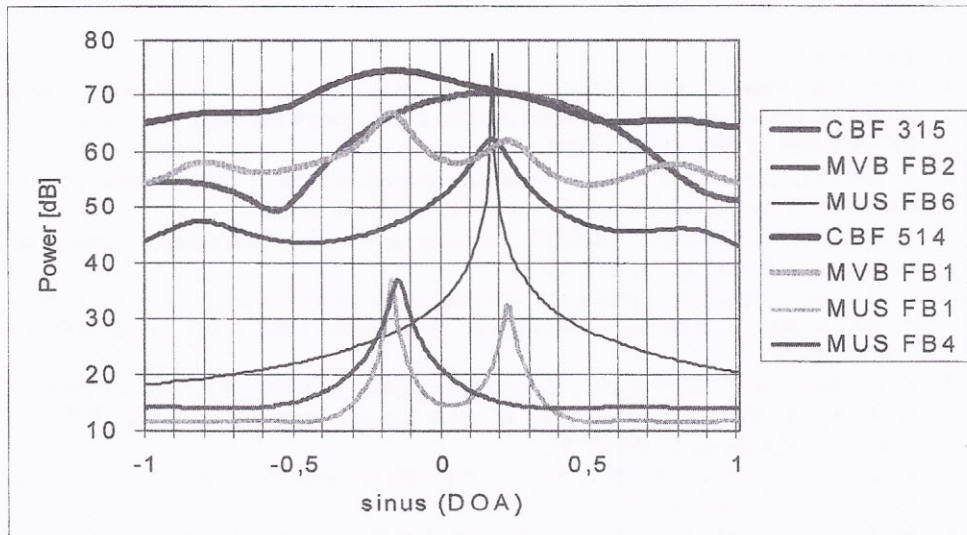
$$N - L > M \quad (11)$$

Do czego prowadzi je nie spełnienie widać na rys.2. Dla krzywej MVBFB2 (5 maksimów) powyższa zależność jest spełniona ($M=5$, $L=2$, $N=8$), a dla krzywej MVBFB3 już nie, co prowadzi do zgubienia informacji o kilku sygnałach odbitych (tylko 2 a nie 5 maksimów).



Rys. 2. Kątowe spektrum anteny dla pojedynczego źródła sygnału sinusoidalnego 514Hz docierającego pod kątem -45° . Badania w hali laboratorium przy licznych i silnych odbiciach. Wąskopasmowa częstotliwość przetwarzania 514Hz, $\Delta f=8$ Hz.

Fig. 2. Array power spectrum for single sinusoidal 514Hz signal of the DOA= -45° . An experiment in a laboratory hall with strong multipath scenario. Narrowband processing frequency 514Hz, $\Delta f=8$ Hz.



Rys. 3. Kątowe spektrum anteny dla dwóch źródeł: sygnał sinusoidalny 514Hz (DOA= -13°) oraz szum (DOA= 13°). Badania na wolnym powietrzu, wąskopasmowa częstotliwość przetwarzania 514Hz lub 315Hz, $\Delta f=8$ Hz).

Fig. 3. Array power spectrum for two sources: sinusoidal 514Hz signal (DOA= -13°) and white noise (DOA= 13°). Field experiments, processing frequency 514Hz or 315Hz, $\Delta f=8$ Hz.

Choć w ogólności technika FBSS prowadząca do dekorrelacji sygnałów w środowisku propagacji wielotorowej poprawia efekty lokalizacji źródeł to jak wykazuje powyższy przykład technikę tę należy stosować ostrożnie. Wynika to też z rys.3. Pomimo występowania dwóch źródeł sygnału lokalizowanych dla częstotliwości przetwarzania 514Hz (krzywa MUSFB1) silne uśrednianie (MUSFB4) gubi informację o jednym źródle.

Rozdzielczość algorytmu MVB jest znacznie lepsza niż CBF, jednak najlepsze rezultaty osiąga w tym zakresie MUSIC, dla którego wysokość maksimum przekracza nawet 30dB. Wysoka rozdzielczość algorytmu MUSIC, należącego do tak zwanych metod podprzestrzeni szumów, jest jednak okupiona jego wrażliwością na skorelowanie sygnałów i błędy modelu. W szczególności, nietrafne oszacowanie ilości źródeł M może w znaczący sposób pogorszyć jego efektywność.

Wyniki pomiarów i przetwarzania, należy niewątpliwie uznać za zadowalające. Zwłaszcza, że po raz pierwszy przeprowadzone eksperymenty wykonane były w „trudnych” warunkach pomiarowych. Chodzi tu przede wszystkim o trzy czynniki – małą długość anteny (przy częstotliwości przetwarzania około 300Hz wynosiła ona zaledwie 2λ), warunek (2) strefy dalekiej, z którego wynika założenie fali płaskiej i który spełniano w stosunkowo łagodnej postaci oraz, w odniesieniu do pomiarów w laboratorium, silne odbicia (niekiedy od elementów o wymiarach porównywalnych z długością fali).

Przedstawione wyniki przetwarzania dają optymistyczną prognozę co do możliwości efektywnej, pasywnej lokalizacji celów akustycznych (hydroakustycznych). Wydaje się więc pożądane kontynuowanie zapoczątkowanych prac zarówno w zakresie eksperymentalnym jaki i teoretycznym. Celowe jest zwłaszcza opracowanie dalszych, alternatywnych metod przetwarzania sygnałów w tym zakresie, w tym między innymi parametrycznych metod dopasowania podprzestrzeni.

LITERATURA

1. H. Chodkiewicz, M. Grabowski, S. Henclik, „Pomiary i analiza wyników wyznaczania namiarów źródeł szumów za pomocą modelu anteny pasywnej, wyd. wew. OBR CTM nr RF-99/T-066 i T-084, Gdynia 1999.
2. S. Henclik, „Spektralne metody określania kierunków źródeł fal hydroakustycznych w pasywnych systemach lokalizacji”, VII SWTM, Gdynia, 10'99.
3. S. Henclik, „Estymacja i rozkład macierzy korelacji przestrzennej sygnału anteny pasywnej”, VII SWTM, Gdynia, 10'99.
4. S. Henclik, „Algorytmy i procedury wstępnego przetwarzania sygnałów i podstawowych metod namiaru w systemach pasywnych”, wyd. wew. OBR CTM nr RF-2000/T-020, Gdynia, 2000.
5. A. Kiełbasiński, H. Schwetlick, „Numeryczna algebra liniowa”, WNT, W-wa 1994.
6. H. Krim, M. Viberg, „Two decades of array signal processing research”, IEEE Signal Processing Magazine, 67-94, 07'96.
7. P. Stoica, A. Nehorai, „MUSIC, maximum likelihood and Cramer-Rao bound”, Trans. on ASSP v.37, 720-741, 05'89.
8. M. Wax, I. Ziskind, „On unique localization of multiple sources by passive sensor arrays”, Trans. on ASSP v.37, 996-1000, 07'89.
9. M. Wax, T. Kailath, „Detection of signals by information theoretic criteria”, Trans. on ASSP v.33, 387-392, 04'85.
10. R. Williams, S. Prasad, A. Mahanalabis, L. Sibul, „An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment”, Trans. on ASSP v.36, 425-432, 04'89.