

KORNATOWSKI Eugeniusz

KSZTAŁTOWANIE CHARAKTERYSTYK KIERUNKOWYCH MATRYC MIKROFONÓW

W artykule przedstawiono zagadnienia rejestracji dźwięku z wykorzystaniem przestrzennych układów wielu mikrofonów. Omawiana problematyka dotyczy tzw. beamforming'u, modelowania przestrzennych charakterystyk kierunkowych matryc mikrofonów, a także współczesnych technologii realizacji nagrań wielokanałowych z przeznaczeniem do odtwarzania w systemach dźwięku przestrzennego.

FORMING DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF MICROPHONE ARRAYS

In this article the issues concerning sound recording with the use of three-dimensional systems of several microphones were considered. The issues under study concern the so called beamforming, which is modeling three-dimensional directivity patterns of microphone arrays, as well as modern technologies of multichannel recording production with the purpose of reproduction in surround sound systems.

1. WSTĘP

Współczesna technika rejestracji dźwięku, w zdecydowanej większości przypadków, oparta jest na technologii wielomikrofonowej. Wykorzystuje się przy tym mikrofony o określonych charakterystykach kierunkowych: dookólne (wszech-kierunkowe), ósemkowe i kardoidalne (w odmianach: sub-, super-, hiper-kardoidalne). Zastosowanie do rejestracji pojedynczego mikrofonu o znanej charakterystyce kierunkowej czyni proces nagrania w pełni kontrolowanym: z dużym prawdopodobieństwem można przewidzieć wielkość i geometrię obszaru, w ramach którego skutecznie zostanie zarejestrowany dźwięk emitowany przez poszczególne źródła. Stosując technologię wielomikrofonową efekt końcowy jest często trudny do przewidzenia. W takich przypadkach, w inżynierii dźwięku, stosuje głównie metodą opartą na wykonywaniu wielu próbnych rejestracji, zmieniając przy tym geometrię układu mikrofonów. Problem jest jeszcze bardziej złożony, gdy wykonywane nagranie przeznaczone jest do reprodukcji w systemie dźwięku przestrzennego, np. 5.1. W takim przypadku, oprócz spełnienia wymogu zarejestrowania dźwięku poszczególnych źródeł z wysoką jakością, należy zagwarantować możliwość

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Elektryczny, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin,
tel.: 91 449 53 11, e-mail: korn@zut.edu.pl

planarnej lokalizacji pozornych źródeł dźwięku w czasie odtwarzania wielokanałowego. Mając na uwadze powyższe przesłanki można stwierdzić, że niezwykle użyteczne byłoby analityczne narzędzie, pozwalające na symulacyjne konfigurowanie układu (matrycy) mikrofonów. Proces ten często w literaturze określany jest jako „beamforming” [7, 8].

2. CHARAKTERYSTYKI KIERUNKOWE PRZESTRZENNYCH UKŁADÓW MIKROFONÓW

Najważniejsze właściwości mikrofonów określone są dwiema wielkościami: skutecznością i kierunkowością. Skuteczność przy określonej częstotliwości, jest to stosunek napięcia na zaciskach (wyjściu) mikrofonu obciążonego impedancją nominalną do ciśnienia akustycznego w miejscu lokalizacji mikrofonu [6]:

$$S_u = \frac{U}{p}, \quad \left[\frac{V}{Pa} \right] \quad (1)$$

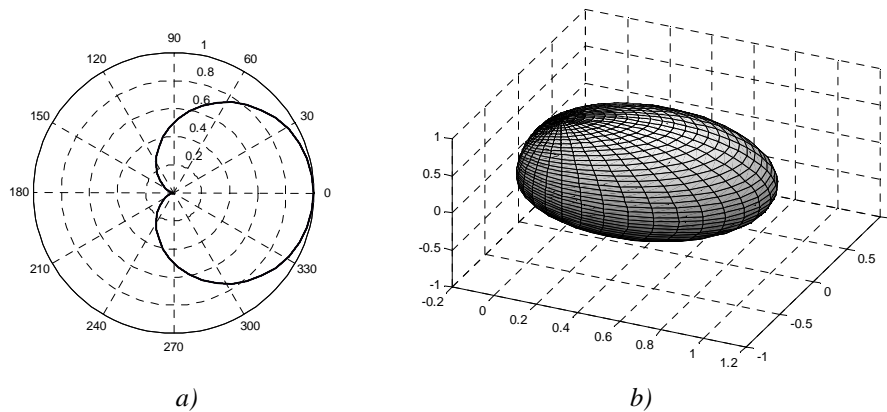
Właściwości kierunkowe mikrofonu określone są stosunkiem skuteczności przy dowolnym kierunku padania fali dźwiękowej na mikrofon do skuteczności przy padaniu prostopadłym na element odbierający energię akustyczną. Przebieg tego stosunku w funkcji kąta padania fali nazywa się charakterystyką kierunkową [6].

W badaniach symulacyjnych najczęściej modeluje się charakterystykę kierunkową pojedynczego mikrofonu jako różnicę charakterystyk mikrofonów wszechkierunkowego (ciśnieniowego) i ósemkowego (ciśnieniowo – gradientowego) usytuowanych w odległości wzajemnej l . Jeżeli τ jest opóźnieniem między sygnałami obu mikrofonów, f określa częstotliwość, a θ kierunek (kąt azymutu), z którego fala płaska dociera do obu mikrofonów, to charakterystyka kierunkowa modelowanego mikrofonu opisana jest następującym równaniem [5]:

$$U(f, \theta) = 1 - A \cdot \exp\left(-j \cdot 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot \left(\tau + \frac{l \cdot \cos \theta}{c}\right)\right) \quad (2)$$

gdzie: $A \in < 0, 1 >$, c – prędkość dźwięku w powietrzu wynosząca 340 m/s.

W zależności od współczynnika A i czasu opóźnienia τ można zamodelować charakterystykę kierunkową od wszechkierunkowej do ósemkowej. Na rysunku 1 pokazano przykładową charakterystykę mikrofonu o charakterystyce kardioidalnej. Na rysunku 1 (b) osi są bezwymiarowe. Każdy punkt pokazanej powierzchni reprezentuje wzmocnienie mikrofonu wzdłuż kierunku: punkt powierzchni – środek układu współrzędnych.



Rys. 1 Charakterystyka kierunkowa mikrofonu kardioidalnego dla jednej częstotliwości 1000Hz: (a) wykres biegunowy (polar plot), (b) charakterystyka kierunkowa 3-D, jako funkcja kąta azymutu i elewacji

Modelowanie charakterystyk kierunkowych układów (matryc) mikrofonów w ogólnym przypadku może być dokonywane dla pola bliskiego lub dalekiego. W przypadku pola bliskiego w obliczeniach należy uwzględnić odległości źródła dźwięku od poszczególnych mikrofonów matrycy. Dla pola dalekiego zakłada się, że odległości wzajemne mikrofonów matrycy są dużo mniejsze niż odległość geometrycznego środka układu mikrofonów od źródła dźwięku; czoło padającej fali akustycznej jest płaskie.

Dalej zakłada się, że rozpatrywany jest przypadek pola dalekiego. Dla systemu mikrofonów rozmieszczonych w płaszczyźnie poziomej, charakterystykę kierunkową takiej matrycy można opisać następującym równaniem:

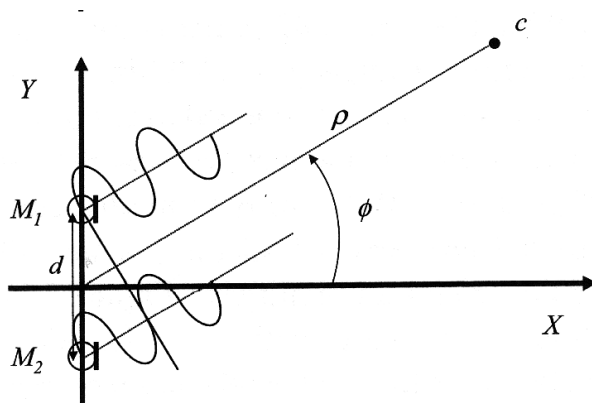
$$U_M(f, \theta) = \sum_m U_m(f, \theta - \alpha_m) \cdot \exp\left(-j \cdot 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot \frac{l_m}{c} \cdot \cos(\theta_m - \theta)\right) \quad (3)$$

Zależność (3) umożliwia wyznaczenie charakterystyki kierunkowej U_M dla planarnej matrycy mikrofonów z uwzględnieniem charakterystyk kierunkowych U_m mikrofonów składających się na matrycę. Pozycja każdego z mikrofonów opisana jest odległością l_m od środka układu współrzędnych XY i kątem θ_m kierunku: mikrofon – źródło dźwięku. Kąty α_m są kątami obrotu wokół osi każdego z mikrofonów i są mierzone względem dodatniej części osi X w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Wzór (3) można uogólnić dla przypadku matrycy 3-D, zawierającej zestaw 'm' sztuk mikrofonów, i wówczas:

$$U_M(f, \theta, \varphi) = \sum_m U_m(f, \theta - \alpha_m, \varphi - \beta_m) \cdot \exp\left(-j \cdot 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot \frac{l_m}{c} \cdot \cos(\theta_m - \theta) \cdot \cos(\varphi_m - \varphi)\right) \quad (4)$$

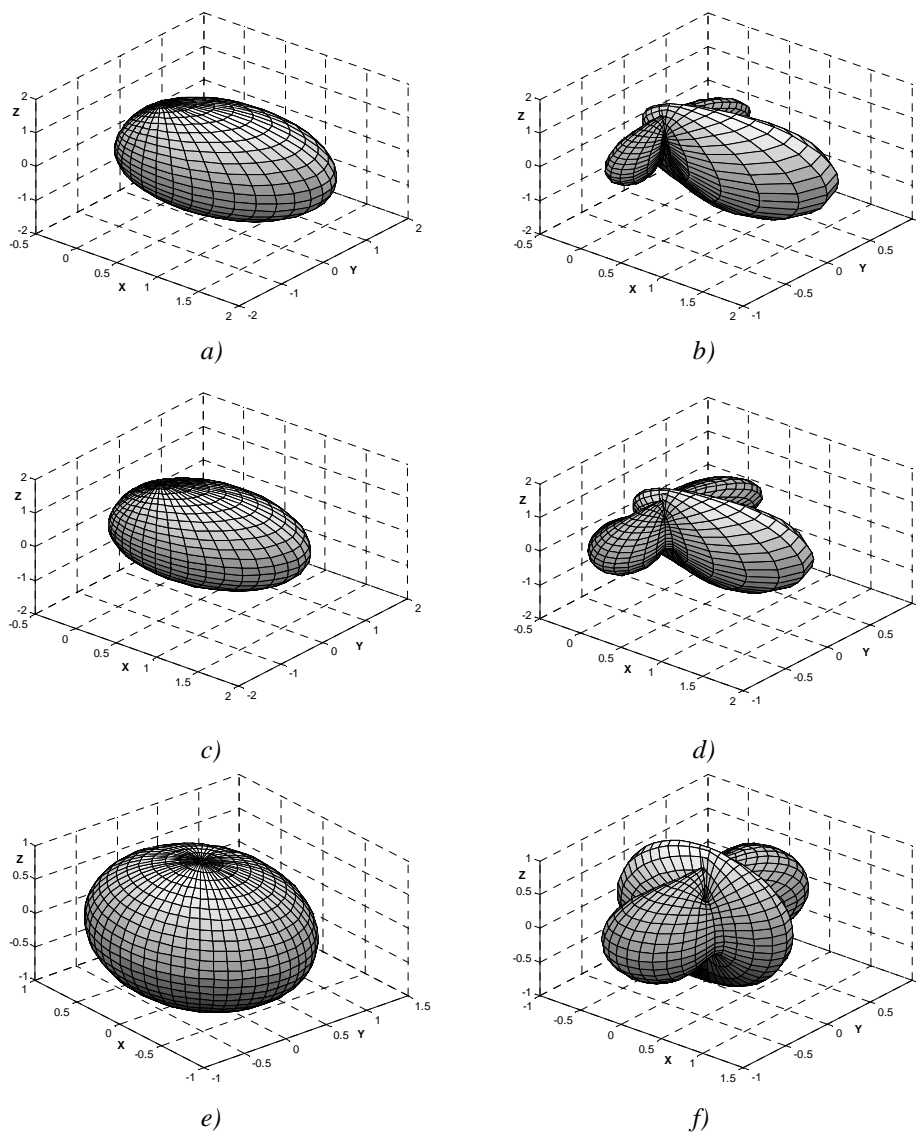
gdzie: α_m, β_m – kąty azymutu i elewacji mikrofonu ‘m’, θ_m, φ_m – kąty azymutu i elewacji kierunku mikrofon ‘m’ – źródło dźwięku.

Wykorzystując zależności (3) i (4) można z powodzeniem analizować charakterystyki kierunkowe (amplitudowe i fazowe) przestrzennych układów mikrofonów o dowolnych charakterystykach kierunkowych mikrofonów składowych. Niech będzie dany przykładowy układ mikrofonów dwu mikrofonów M1 i M2 (rys.2):



Rys.2 Przykładowy układ dwu mikrofonów

Odległość każdego z mikrofonów od środka układu współrzędnych jest identyczna i wynosi $l_1=l_2=d/2$. Charakterystyka kierunkowa tego układu zostanie określona przy założeniu, że odległość ρ źródła dźwięku c od układu mikrofonów jest znacznie większa od d , tzn. $\rho \gg d$, oraz każdy z mikrofonów posiada kardoidalną charakterystykę kierunkową. Przyjmując $d = 0.34$ m otrzymano wyniki pokazane na rysunku 3. Charakterystyki kierunkowe obliczono dla częstotliwości 100 Hz i 1500 Hz oraz dla trzech przypadków ustawień kątów azymutu mikrofonów M1 i M2: w pierwszym przypadku przyjęto $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$ (sytuacja jak na rysunku 2), a w drugim: $\alpha_1 = 45^\circ$ i $\alpha_2 = -45^\circ$ i w trzecim: $\alpha_1 = 90^\circ$ i $\alpha_2 = -90^\circ$. Analiza rysunku 3 pozwala stwierdzić, że kształt wypadkowej charakterystyki kierunkowej ściśle zależy od częstotliwości i od geometrii układu mikrofonów. Szczególne znaczenie ma przy tym wzajemna odległość przetworników. Jak pokazano to np. w [2], dla fal akustycznych o długości mniejszej niż $2d$ charakterystyka kierunkowa układu mikrofonów będzie wykazywać znaczne nierównomierności, co jest równoznaczne ze stwierdzeniem, że czułość matrycy będzie bardzo silnie zależeć od kierunku (kąta azymutu). W analizowanym przypadku ($d = 0.34$ m) częstotliwość, powyżej której wypadkowa charakterystyka kierunkowa ulega podziałowi na listek główny i szereg listków bocznych wynosi 500 Hz.

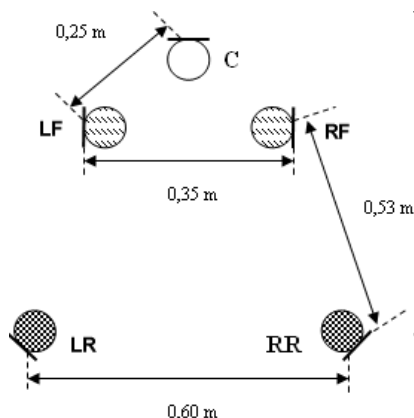


Rys. 3. Charakterystyki kierunkowe układu dwu mikrofonów: a) $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$, $f = 100$ Hz, b) $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$, $f = 1500$ Hz, c) $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = -45^\circ$, $f = 100$ Hz, d) $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = -45^\circ$, $f = 1500$ Hz, e) $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = -90^\circ$, $f = 100$ Hz, f) $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = -90^\circ$, $f = 1500$ Hz

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE I SYMULACYJNE

Badania przeprowadzono na przykładzie systemu mikrofonów „Atmos” zawierającej pięć mikrofonów VM1 firmy Brauner zamocowanych na pięcioramiennej, planarnej statywie ASM5.

System „Atmos” przeznaczony jest do rejestracji nagrań dedykowanych systemom dźwięku przestrzennego 5.0 (5.1). Mikrofony, wszystkie o charakterystykach kardioidalnych, rejestrują następujące sygnały: C – środek przód (centralny), LF i RF – lewy przód i prawy przód, LR i RR – lewy tył i prawy tył odpowiednio. Każdy z mikrofonów może być obracany wokół własnej osi w zakresie $\pm 90^\circ$ w stosunku do osi odpowiedniego ramienia statywu. Konstrukcja matrycy jest symetryczna względem osi przód – tył, a jej geometria pokazana jest na rysunku 4.

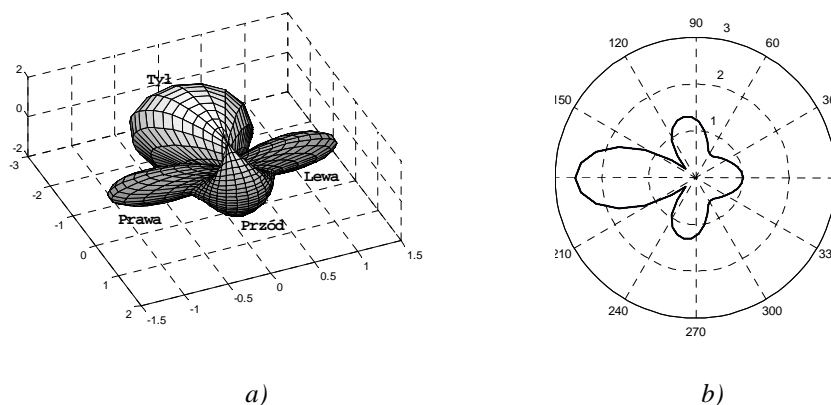


Rys.4. Geometria statywu ASM5 z mikrofonami VM1 systemu „Atmos”

Producent zaleca, aby podczas nagrania osi maksymalnej czułości mikrofonów pokrywały się z osiami odpowiednich ramion statywu (ustawienie standartowe).

Wykorzystując matrycę „Atmos” wykonano kilkakrotnie nagrania testowe koncertów orkiestry symfonicznej w Filharmonii Szczecińskiej. Sygnał zapisywany był na cyfrowym rejestratorze Zaxcom „Deva” z rozdzielczością 24. bitową i częstotliwością próbkowania 96 kHz. W czasie eksperymentu osi maksymalnej czułości każdego mikrofonu pokrywały się z osiami odpowiednich ramion statywu (ustawienia standartowe). Przy odsłuchu tak zapisanego przekazu okazało się, że mimo zgodnego z normą ITU-R-BS.775-1 rozmieszczenia systemów głośnikowych w przedniej scenie dźwiękowej wystąpiło zjawisko niedostatecznej lokalizacji pozornych źródeł dźwięku z wyraźną dominacją tła (kanałów tylnych) i kanału centralnego. Można przypuszczać, że za ten negatywny efekt odpowiadają wyłącznie błędnie ustawione kąty poszczególnych mikrofonów. Jakość samych mikrofonów nie pozostawia żadnych wątpliwości – mikrofony VM1 należą do grupy najlepszych na świecie mikrofonów studyjnych. W celu ewentualnego potwierdzenia tej hipotezy przeprowadzono badania symulacyjne wykorzystując metodę opisaną w punkcie 2, zakładając przy tym, że źródło dźwięku znajduje się daleko od mikrofonu. A zatem badania symulacyjne wykonane zostały dla tzw. pola dalekiego. Charakterystyka

kierunkowa systemu „Atmos” z ustawieniami standartowymi ma kształt taki, jak pokazano na rysunku 5.



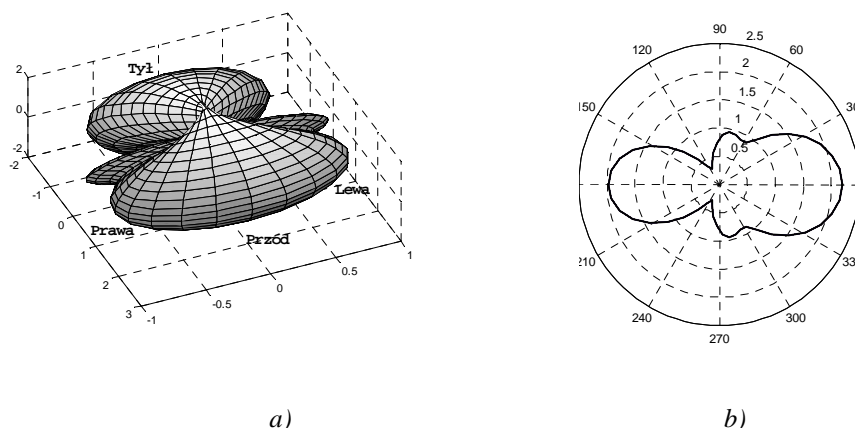
Rys.5. Charakterystyka kierunkowa systemu „Atmos” z mikrofonami o standartowym ustawieniu kątów dla częstotliwości $f = 500$ Hz: a) wykres 3-D, b) charakterystyka kierunkowa w płaszczyźnie XY.

Na wykresie 3-D osi są bezwymiarowe. Każdy punkt pokazanej powierzchni reprezentuje skuteczność matrycy wzdłuż kierunku: punkt powierzchni – środek układu współrzędnych XYZ. Uzyskane charakterystyki potwierdziły obserwacje związane z degradacją przedniej sceny dźwiękowej. Charakterystyka kierunkowa jest bardzo nierównomierna (daleka od cyrkulacyjnej) szczególnie w obszarze przedniej sceny dźwiękowej. Dalszy etap badań, to poszukiwanie optymalnych kątów obrotu poszczególnych mikrofonów. Dokonując zmian tych kątów, z wykorzystaniem modelowania numerycznego, poszukiwano takich ustawień, które zagwarantują maksymalnie cyrkulacyjną charakterystykę kierunkową głównie w zakresie przedniej sceny dźwiękowej. Przeprowadzone eksperymenty doprowadziły do następującego wniosku: mikrofon LF należy obrócić o kąt $+70^{\circ}$ w stosunku do ustawienia standartowego (kierunek obrotu zgodny z ruchem wskazówek zegara), mikrofon RF -70° , mikrofony C, LR i RR pozostawić w ustawieniach standartowych. Uzyskaną charakterystykę pokazano na rysunku 6.

Po dokonaniu zmian w ustawieniu mikrofonów dokonano powtórnie nagrań w sali koncertowej. Subiektywna „czytelność” i lokalizacja pozornych źródeł dźwięku w przedniej scenie dźwiękowej uległa znaczącej poprawie w stosunku do standartowych ustawień mikrofonów.

Wykonane nagrania poddano weryfikacji subiektywnej w Laboratorium Inżynierii Dźwięku i Ambiofonii na Wydziale Elektryczny Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Testy tego rodzaju są powszechnie stosowane. Z uwagi na ich podstawowe znaczenie w szacowaniu jakości wielokanałowych sygnałów i systemów rejestracji i odtwarzania dźwięku przestrzennego, procedura i warunki ich przeprowadzania są standaryzowane [3, 4].



Rys.6. Charakterystyka kierunkowa systemu „Atmos” po optymalizacji ustawienia kątów dla częstotliwości $f = 500$ Hz: a) wykres 3-D, b) charakterystyka kierunkowa w płaszczyźnie XY.

Eksperyment dotyczący subiektywnej oceny systemu „Atmos” po optymalizacji przeprowadzono z udziałem 28. słuchaczy - ekspertów. Zadaniem ekspertów było porównanie jakości próbek nagrań wykonanych systemem „Atmos” o ustawieniach mikrofonów w pozycji standardowej i po optymalizacji. Ocenie podlegały następujące parametry:

1. Jakość dźwięku kanałów przednich rozumiana jako: stabilność przedniego obrazu dźwiękowego, szerokość przedniej sceny akustycznej, precyzja lokalizacji pozornych źródeł dźwięku, wrażenie właściwego rozmieszczenia źródeł dźwięku w zależności od rodzaju i charakteru zarejestrowanego wydarzenia (np. zgodna z oczekiwaniami lokalizacja grup instrumentów w przypadku odtwarzania koncertu orkiestry symfonicznej).
2. Jakość dźwięku kanałów tylnych rozumiana jako: stabilność tylnego obrazu dźwiękowego (analogicznie jak w punkcie 1.), spójność przestrzeni dźwiękowej (brak wrażenia pustki w pewnym miejscu, np. bezpośrednio za słuchaczem, w obszarze tylnej sceny akustycznej), odpowiednia lokalizacja i usytuowanie źródeł dźwięku w przestrzeni.
3. Wrażenie przestrzenności, czyli: odczucie wielkości pomieszczenia, właściwa długość czasu pogłosu dla danych warunków wydarzenia (dla danego pomieszczenia), realizm przestrzeni dźwiękowej, wrażenie „obecności”: odczucie przebywania w miejscu dokonywania nagrania jako miara realizmu brzmienia, stosunek dźwięków bezpośrednich do odbitych: w przypadku dominacji dźwięków odbitych wystąpi wrażenie tzw. „sztucznej perspektywy akustycznej”.
4. Przejrzystość (wyrazistość), czyli: zrozumiałość mowy, możliwość identyfikacji i wyróżnienia głosów i dźwięków brzęmiących jednocześnie, separacja poszczególnych krótkich dźwięków występujących w małych odstępach czasu.

5. Balans: dynamika odtwarzanego utworu (odpowiednia do charakteru zdarzenia dźwiękowego), proporcje głośności między kanałami przednimi a tylnymi.
6. Ocena ogólna: subiektywna ocena nagrania, uwzględniająca wcześniej opisane parametry oraz jakość nagrania jako całości i ogólne wrażenie jakie nagranie wywarło na słuchaczu.

Ocena słuchaczy – ekspertów polegała na wypełnieniu formularza ankiety i punktowaniu poszczególnych parametrów w skali od 1 (źle) do 6 (znakomicie).

Tab. 1. Wyniki testów systemu „Atmos”

Konfiguracja	Numer parametru					
	1	2	3	4	5	6
Standard	35	142	27	110	15	63
Optymalizowana	156	151	162	115	163	117

Wyniki testów wykazały (Tab. 1), że optymalizacja ustawień mikrofonów miała szczególnie pozytywny wpływ na jakość przedniej sceny dźwiękowej, poprawiło się znacznie wrażenie przestrzenności odtwarzanych nagrań, a także wysoko oceniono balans dźwięku otaczającego słuchacza.

Wykonane badania dotyczyły przypadku nagrań wykonywanych w dużej sali koncertowej. Można z dużym prawdopodobieństwem twierdzić, że dla rejestracji w pomieszczeniach o małej kubaturze i niewielkiej ilości obiektów emitujących dźwięk, optymalna konfiguracja systemu „Atmos” będzie inna niż pokazano to wyżej. Symulacyjne badania charakterystyk w takim przypadku powinny być wykonane dla tzw. pola bliskiego [1].

4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodę analizy i modelowania charakterystyk kierunkowych układów (matryc) mikrofonów dla pola dalekiego. Metodę symulacyjną, opartą na modelu matematycznym charakterystyki kierunkowej pojedynczego przetwornika, poddano weryfikacji na prostym przykładzie układu dwu mikrofonów o charakterystykach kardoidalnych. Proponowany algorytm tzw. beamforming’u wykorzystano do optymalizacji ustawień mikrofonów w profesjonalnym systemie rejestracji dźwięku „surround” 5.1. Przeprowadzone liczne badania eksperymentalne i testy subiektywne wykazały, iż numeryczna symulacja kształtu charakterystyki kierunkowej matrycy mikrofonów w dużej mierze odzwierciedla subiektywną ocenę nagrań zarejestrowanych techniką wielomikrofonową.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Chen H., Ser W., Yu Z.: *Optimal design of near field wideband beamformers robust against errors in microphone array characteristics*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, No. 54(9), 2007, str. 1950 – 1959
- [2] Doclo S., Moonen M.: *Design of broadband beamformers robust against gain and phase errors in the microphone array characteristics*, IEEE Transactions on Signal Processing, No 51 (10), 2003, str. 2511-2526

-
- [3] European Broadcasting Union Tech. 3286-E: *Assessment methods for subjective evaluation of the quality of surround programme material – Music*, EBU Official Technical Texts, Geneva, 1997
 - [4] European Broadcasting Union Supplement 1 to Tech. 3286: *Assessment methods for the subjective evaluation of the quality of sound programme material – Multichannel*, EBU Official Technical Texts, Geneva, 2000
 - [5] Jamroz A.: *The Design and Use of a Double Cardioid Stereophonic Microphone*, Journal of the Audio Engineering Society, vol. 8 No. 2, 1960, str. 100 – 104
 - [6] Leighton T.G. : *The Acoustic Bubble*, Academic Press, San Diego, 1999
 - [7] Raichel D.: *The Science and Applications of Acoustics*, Springer, New York, 2006
 - [8] Van Trees H.L.: *Optimum Array Processing*, John Wiley & Sons, New York, 2002