

# **Abstract of Doctoral Dissertation**

## **Title : Sound Quality Improvement and Directivity Control for Parametric Array Loudspeaker**

Doctoral Program in Advanced Information Science and Engineering  
Graduate School of Information Science and Engineering  
Ritsumeikan University

コウ イクテイ  
GENG Yuting

With the development of audio technology, the demand for directional sound grows. Parametric array loudspeaker (PAL) utilizes ultrasound to realize a sharp directivity and its practical application for generating directional sound is promising. This thesis focused on the sound quality and directivity control of PAL aiming for the practical use.

Ultrasounds are emitted intensely from PAL and the difference frequency component self-demodulates due to the nonlinear interactions in the air. Therefore, the sound reproduced by PAL shows a difficulty in low-frequency reproduction, and it holds more harmonic distortions comparing with the sound reproduced by conventional electro-dynamic loudspeakers. It is known that the demodulated sound pressure increases as the emitted power. In the case that the scale of device is unlimited, enlarging the number of ultrasonic transducers can be a solution to the poor low-frequency reproduction. This thesis gives a method to realize a flat frequency response for PAL by enhancing the low-frequency with the multi-way structure. In this method, the proposed multi-way PAL is composed with Woofer PAL and Tweeter PAL. The scale of these parts are balanced to reach a flatter frequency response. In addition, the hardware arrangement is studied under the consideration of the directivity. Moreover, suitable modulation methods are chosen for each band. The harmonic distortion is utilized to enhance the low-frequency. Based on the proposed method, a prototype multi-way PAL is built for validation. The experimental results show that the proposed method can achieve a flatter frequency response in a wide band.

In some cases of practical application, the scale of device may be limited. It is a considerable way to realize a flat frequency response by equalization. Due to the difficulty for PAL in low-frequency reproduction, the total demodulated sound pressure is predicted to decrease after the equalization. Under this condition, it is necessary to over-boost PAL, which means increasing the driving voltage for a higher sound pressure. However, it brings an issue that the nonlinear distortions increase as the driving voltage. Therefore, this thesis gives a sound quality improvement method which involves a consideration of the driving voltage. This method is specialized for harmonic sounds like speech and music. The difference of the harmonic structure between the demodulated sound and the original sound

is investigated. The proposed method modifies the spectrum in advance to counteract the nonlinearity so that the original spectrum can be restored in the demodulated sound. Further, the proposed method provides optimized parameters according to the determined driving voltage. The effectiveness has been demonstrated by the experimental results, which shows that the proposed method can achieve a higher fidelity of spectral characteristics when reproducing harmonic sounds.

When downscaling the device of PAL, there is another latent problem that the acoustic beam generated by PAL may diffuse. In addition, a sharper beam than ordinary PAL is desired in some cases. Therefore, this thesis also gives a directivity control to form a sharper beam. It is known that the principle of PAL is parametric effect. If the parametric effect can be weakened spatially, the acoustic beam generated by PAL can be controlled. Based on this assumption, the proposed method utilizes phase inversion to achieve a sharper beamwidth. The characteristics of the modulated wave is considered when designing the phase inversion strategy. The measured results demonstrated that the proposed method can achieve a narrower acoustic beam.

# 博士論文要旨

## 論文題名：パラメトリックスピーカにおける音質改善 および指向性制御

立命館大学大学院情報理工学研究科  
情報理工学専攻博士課程後期課程

コウ イクテイ  
GENG Yuting

音響技術の発展に伴い、指向性音源の需要は高まりつつある。パラメトリックスピーカ (Parametric array loudspeaker: PAL) は超音波を利用し、鋭い指向性を実現できる。そのため、近年、PAL を指向性音源としての応用が期待される。この論文は PAL の実用化に向けて、音質の改善と指向性の制御に着目している。

PAL から超音波を大音圧で放射すると、空気の非線形性により、周波数の差の成分が自己復調する。この原理により、PAL は低周波音の再生が困難となる。その上、非線形現象により、従来の動電型スピーカの再生音より、PAL の再生音に高調波歪みが多く含まれる。PAL の復調音は放射した超音波のパワーと正の相関があるため、機材の規模に制限がない場合、PAL を構成する超音波素子の数を増やすことで、低周波音の再生困難という問題を解決できる。この論文では、マルチウェイ構造を用いて、低周波音を強調することで平坦な周波数特性を実現する手法を挙げる。この手法で提案されたマルチウェイ PAL は Woofer PAL と Tweeter PAL で構成される。より平坦な周波数特性を実現するために、両部分の規模と配置及び変調方式に関する検討を行なった。特に、低周波音を強調するために、高調波歪みを有効活用した。提案手法に基づき、試作機を開発した。評価実験の結果、提案手法を用いて、広帯域においてより平坦な周波数特性の実現を確認した。

PAL の実用化場面では、機材の規模が制限される場合もある。この場面において、周波数特性のイコライジングを用いて平坦な周波数特性を実現することが考えられる。しかし、イコライジングを行うと、全体的に再生音の音圧が低下する。そのため、より高い復調音圧を求めるために、印加電圧を上げることが必要となる。これをオーバーブーストと呼ぶ。オーバーブーストにより、非線形歪みの増加という問題があるため、本論文では、印加電圧を考慮した音質改善手法を挙げる。この手法は調波信号に着目し、復調音と原音のスペクトルの差異を調べる。提案手法は原音のスペクトルが復調音に再現するように、あらかじめ原音のスペクトルを歪ませる。その上、予期した印加電圧に最適なパラメータを生成する。評価実験の結果、提案手法は復調音に原音のスペクトルをより忠実に再現できることが確認できた。

PAL を小型化する時、PAL で形成された音響ビームが拡散する問題点がある。また、応用場面により、さらに鋭いビームが求められることもある。本論文では、より鋭いビームを形

成する指向性制御手法を提案する。PALの原理はパラメトリック効果である。もしパラメトリック効果を空間上部分的に弱めることが可能であれば、PALの復調音により形成されたビームを制御可能となる。提案手法では、変調波の一部成分の位相を反転することで、より狭いビーム幅を実現する。位相反転する際、変調方式の特徴も考慮する。評価実験の結果、提案手法を用いることで、より狭い音響ビームの形成が確認できた。