

目 次

早稲田大学学位論文 (博士) 1 ~ 3

審査要旨

広報第 1745 号に掲載

工学博士 (早稲田大学) (早大甲第 614 号)

山 崎 芳 男 (大学院理工学研究課)

電気工学専攻

(大学院理工学研究課研究生)

早 稲 田 大 学 学位論文 (博士) 審査要旨

工学博士 (早稲田大学) (課程修了による者)

(大学院理工学研究科

山 崎 芳 男 (電気工学専攻)

(大学院理工学研究科研究生)

論文題目「広帯域音響信号のデジタル信号処理に関する研究」

高品質の音響信号を取り扱う円盤レコード系や放送系においては、プログラムの編成にあって高性徳の磁気テープ録音再生装置 (テープレコーダ) を使用することが常套手段とされているが、レコード録音系と再生系および放送系と受信系を構成する機器の性能が一段と向上した 1960 年頃に、テープレコーダのダイナミックレンジの不足とワウやジッターによる音質の劣化およびヒス雑音の発生等が問題とされるようになった。この隘路を打開する目的で PCM (パルス符号変調) 方式を導入したテープレコーダの開発研究が開始され、1968 年に NHK 技研で完成された試作機により、従来のテープレコーダのダイナミックレンジ約 60dB に対して、12bit PCM で約 80dB のダイナミックレンジを得るとともに、ワウ、ジッターおよびヒス雑音を完全に除去できることが明らかになった。これに続いて、1972 年に日本コロムビア (株) が業務用の 13bit PCM テープレコーダを開発し、ほぼ 90dB のダイナミックレンジを得て、これを用いて製作したマスターテープにより円盤レコードの製造を開始した。

このように、音響信号がデジタル化されると、これをアナログ信号に戻さずに、デジタルのまま、ミキシング、音質調整、フェードイン、フェードアウト、残響付加などを行う技術の開発が要望されるようになり、周波数帯域 20Hz ~ 20kHz で約 110dB のダイナミックレンジを有する広帯域音響信号のデジタル処理技術の開発が始められた。また、磁気テープ上に存在するドロップアウトによる雑音やひずみの発

生をほぼ完全に阻止する方法や、AD 変換器と DA 変換器の量子化ステップの不整によって生ずる音響信号の劣化に対する対策なども必要なことが明らかになってきた。本論文はこれらの新しい要望について、順次解決策を見い出しながら進められた一連の研究成果を述べたもので、音響工学の新しい分野を開拓したものである。以下、章を迫って内容を評価する。

第 1 章は序章であって、音響信号処理系へのデジタル技術導入の歴史的経過を述べるとともに、本研究の成果が要望されるようになった背景について述べている。

第 2 章では、広帯域音響信号のデジタル化について論じている。アナログ信号をデジタル化する際に、標準化定理を満足していても、量子化に当たり有限語長の符号に変換するために生ずる量子化雑音による信号の劣化は免れない。しかし、この信号劣化を軽減する方法として、量子化に先立ちディザと称する量子化ステップ Δ に一様分布する確率変数を入力信号に重畳し、AD 変換された量子化出力から同じ確率変数を減算することにより、量子化雑音を入力信号とは無相関でかつ Δ に一様分布するような確率変数に帰着させる方法が知られている。しかし現在広帯域音響信号を処理する 16bit 程度の AD 変換器や DA 変換器には理想特性からの誤差が存在し、量子化ステップが必ずしも一定不変なものではなく、不整な部分のあるものが多く、そのため正確に $\pm\Delta/2$ のディザを重畳したり減算したりすることは至難である。この難点を解決する方法として、著者は量子化ステップの整数倍に一様に分布するかなり振幅の大きいディザを導入し、量子化後にこれを減算する方法を考案し、それによって、ディザ本来の効果である量子化雑音の白色化ばかりでなく、AD 変換器や DA 変換器の不整による誤差をも平均化することに成功し、AD 変換器や DA 変換器の精度を著しく向上できることを明らかにした。さらに、同一の信号に対して大振幅ディザを加えて量子化を N 回行って、これに平均化操作を加えることにより、信号対量子化雑音電力比を $3\log_2 N$ dB 改善できることを明らかにした。この平均化操作を実時間で行うために、高速 AD 変換器の時分割使用による方法および複数の変換器を並列に使用する方法を提案し、実験により所期の成果が得られることを示している。

次いで、大振幅ディザを重畳したうへ高速標準化を行った信号を FIR 型デジタルフィルタで帯域分割することにより、帯域内の量子化雑音電力を低減することの可能なことを見い出し、200kHz で標準化可能な 16bit AD 変換器を使用して、この手法により 20 kHz 帯域で 110dB、80kHz 帯域で 100dB のダイナミックレンジが得られることを確かめた。本研究で

はこの変換装置をデータの取り込みに使用している。

第3章では、広帯域音響信号の統計的性質について論じている。広帯域音信号の代表的な楽音数種類をデジタル化した信号について、レベル分布と各ビットの1の生起確率を求めた結果から、これらの信号は弱定常の確率過程に属することを明らかにし、これを多重マルコフ過程として据えることにより各種の信号の情報量を求めた。またこれらの信号のパワースペクトルも一様には分布せず、高音域で大幅に低下していることを示し、これらの結果から信号の情報量と音響信号伝送系および記録系との容量の整合について検討を行い、標準化周波数40.96kHz、量子化ビット数16でデジタル化した信号と同等の音質の信号を、1標本あたり3～5bitで伝送することが可能なことを明らかにした。

さらに、半導体記憶素子に広帯域音響信号を効率良く格納する手法について検討している。まず、信号を処理する単位としては、聴感上から10～50msが適当であることを確かめ、上記の統計的性質を利用して4～8項の線形予測を用いる方法を検討した。次いで信号を10～50msに分割し、各区間の最大値により量子化ステップを変化させる準瞬時型非一様量子化を導入する方法を検討した。その結果、準瞬時圧伸方式が比較的質の良い音質の信号を量子化するのに適していることを見出し、1標本あたり6bitで聴感上は十分な音質で伝送し得る特性の得られることを明らかにした。

第4章ではデジタル信号処理により信号と雑音を分離する方法について述べている。著者に人の聴覚で判別できる音の違いは電子計算機でも判別が可能な筈であるとの観点に立って、何等かの要因によって劣化した信号をデジタル処理によって復元または補正する方法について検討している。その第一としてクリック性雑音に着目し、人の聴覚はクリック性雑音部分の系統的性質がその前後に続く信号の統計性質と大きく異なっていることから雑音を検出しているものと考え、線形予測を利用して、線形予測値が突然大きく変化する箇所をクリック性雑音として検出し、雑音部分を信号の線形予測値で置換することにより雑音の軽減または除去を可能とする方法をコンピュータ・シミュレーションにより確かめ、円盤レコードの傷などに起因するクリック性雑音を実時間で補正できるハードウェアを構成して実用化した。

第二には、人間の聴覚が音色を判断する場合には、その信号のパワースペクトルだけではなく、各周波数成分間の従属関係をも感知して音色の識別を行っていると考え、高次相関関数をフーリエ変換して得られるポリスペクトルや、周波数領域で倍音関係にある成分を相互相関の手法で抽出するスペクトル相関を用いて信号を解析する方法を検討した。その結果、信号中の比例関係にある複数個の周波数成分を抽出することが可能になり、また信号の倍音構造を把握することにより、再生信号のみからその伝送系で生じた高調波ひずみを推定することが可能であることを明らかにした。さらに、あらかじめ登録してある個々の発音体のポリス

ペクトルパターンあるいはスペクトル相関パターンと種々の複合音のパターンとを比較することにより、騒音に埋もれた特定の信号音を抽出したり、音楽の合奏部分から、特定の楽器音を分離することを可能とした。

第三には、上記の2方法がどれも線形加算的に混合された信号に対するものであるのに対して、複数の信号が掛け合わされたり、たたみ込まれたりしている系に対して、準同形フィルタリングによって線形処理可能な系に変換し、通常線形フィルタリングで処理した後、逆演算によって最初の系で出力を得る方法を開発した。これによりジッターや残響成分の軽視および伝送特性の補正などが可能となった。

第5章では、近接4点法を用いて室内音場の空間情報を把握する方法について述べている。これは室内の1点から発せられたインパルス音を、任意の受音点で近接して配置された4個のマイクロホンで受音し、各マイクロホンへの音波到達時間の微細な差から、直接音に続いて到来する多数の反射点からの反射音の像音源の位置とそれぞれの音源の強さを決定する方法を開発し、これらの像音源から到来する音波を合成することによって、室の残響時間特性、周波数伝送特性、到来波の指向性分布および任意の周波数の定在波分布などを求めることを可能とした。またこのようなデジタル信号処理の導入により、建築音響測定現場では単にインパルス応答あるいは伝達関数のみを収録し、後処理で残響特性、伝送特性、音圧分布および明晰度などを求めることを可能にした。

第6章では、帯域分割処理によるハードウェアの負担軽減について述べている。音響信号の周波数帯域は10octaveにも及ぶために、デジタルフィルタや線形予測などの処理に際し、低周波域に必要な精度を満足するような設計を行うと、高周波域では著しく過剰な精度となる場合がある。このような場合に、直線位相特性のFIR型デジタルLPFを用いて周波数帯域を2分割した後、低い帯域の標本を間引いて標準化周波数を半減し、これを繰り返すことにより全周波数帯域を一定対数帯域幅に分割すると同時に、各帯域の標準化周波数を必要最低限の値にすることが可能である。この方法により、音響信号処理用のIIR型デジタルフィルタの設計に際して、有限語長の影響による雑音やリミットサイクルの発生についての懸念なしに、所要の特性を実現できることを明らかにし、音響分析用オクターブ帯域フィルタ、グラフィックイコライザ、マルチウェイスピーカシステム用チャンネルディバイダなどを構成している。また帯域分割を適用することにより、少数の演算素子で長時間の実時間たたみ込みに可能な装置を構成し、またこれを応用して信号音に任意の室で収録したインパルス応答をたたみ込むことのできる残響付加装置やハウリソグ制御装置などを構成し、実用に供し得ることを明らかにした。

以上要するに、本論文は広帯域音響信号の記録および処理にあたり、デジタル信号処理技術を導入して高性能の録音再生装置を実現し、信号の品質を劣化す

ることなしに伝送容量を節減する方法，線形予測によるクリック性雑音の除去，スペクトル相関や準同形フィルタリングを用いた信号音の分析や分離または除去，近接4点法による室内音響測定法の開発，帯域分割処理によるフィルターや残響付加装置および実時間たたみ込み装置の実現など，従来得られなかった手法を開発して音響工学の進歩に大いなる貢献をしたものと言えよう。よって工学博士（早稲田大学）の学位論文として価値あるものと認める。

昭和59年2月17日

審 査 員

(主査) 早稲田大学教授 工学博士 伊 藤 毅
早稲田大学教授 工学博士 小 原 啓 義
(早大)
早稲田大学教授 工学博士 堀 内 和 夫
(早大)
早稲田大学教授 工学博士 白 井 克 彦
(早大)