

研究速報

遺伝的アルゴリズムを用いたスピーカの高調波ひずみ率測定法

藤岡 豊太^{†a)} (正員)工藤 正平[†]永田 仁史[†] (正員)安倍 正人[†] (正員)

The Harmonic Distortion Level Measurement Technique of a Loudspeaker Using Genetic Algorithm

Toyota FUJIOKA^{†a)}, Member,Shyouhei KUDOU[†], Nonmember, Yoshifumi NAGATA[†],and Masato ABE[†], Members[†] 岩手大学工学部, 盛岡市

Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka-shi, 105-0123 Japan

a) E-mail: toy@cis.iwate-u.ac.jp

あらまし スピーカの高調波ひずみ率測定における信号パワー値推定に遺伝的アルゴリズムを用い、従来法より短時間で測定可能な測定法を提案する。また、本提案測定法をDSPに実装し、実時間測定実験により測定性能の評価を行う。

キーワード スピーカ, 高調波ひずみ, ひずみ率測定, 遺伝的アルゴリズム

1. ま え が き

スピーカで再現される音響信号に含まれるひずみ成分において、主要なひずみの一つが高調波ひずみである[1]。そのため、高調波ひずみはスピーカの性能を表す指標の一つとしても用いられている。高調波ひずみ率測定は、現在はスペクトル解析により測定するのが一般的であり、専用機器のみならず一般のPCなどでも測定することができる。我々は、既に新たな測定法として、安価なDSPなどへ実装し小型で扱いやすい測定器として実現できる、適応フィルタを用いたスピーカの高調波ひずみ率測定法を提案し、DSPを用いた測定実験により提案測定法の有効性を確認している[2]。

2. スピーカの高調波ひずみ率測定

スピーカの高調波ひずみ率測定は、スピーカにテスト信号となる正弦波信号を入力し、スピーカで再現される音響信号に含まれる基本波成分及び高調波成分となる正弦波信号のパワーを求めることにより得られる[3]。テスト信号として、スピーカに振幅 A_0 、角周波数 ω_0 の正弦波 $v_i = A_0 \sin(\omega_0 t)$ を入力すると、高調波ひずみを含むスピーカ信号 v_o は、フーリエ級数展開により式(1)のように表すことができる。

$$v_o = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (1)$$

ここで A_n は各成分の振幅、 ϕ_n は位相である。式(1)より、 $A_1 \sin(\omega_0 t + \phi_1)$ はスピーカ出力信号のテスト信号と同じ周波数成分(以下、基本成分)となる。そして、 $A_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)$, $n = 2, 3, 4, \dots$ が、スピーカの非直線性により引き起こされる第 n 次高調波成分となる。このときIEC規格における第 n 次高調波ひずみ率 DL_n は、式(2)のように表される。

$$DL_n = 20 \log_{10} \frac{|A_n|}{\sqrt{\text{信号の全振幅パワー}}} \quad (2)$$

第 n 次高調波成分の信号パワー値を求める方法として、スペクトル解析法が一般的に用いられている。我々が提案している適応フィルタを用いた測定法は、従来測定法に比べ計算量が大幅に少なくDSPなどへの実装が容易な測定法である[2]。しかし、この測定法でIEC規格による式(2)の高調波ひずみ率を得るには、フィルタ出力が十分収束する必要があり正確な測定値を得るのに時間を要する。

本論文では、式(2)のひずみ率をより短時間で測定する方法として、スピーカ出力信号から式(1)の最適パラメータをGAを用いて直接推定する測定法を提案し、測定実験により測定精度及び測定時間についての性能評価を行う。

3. GAを用いた高調波ひずみ率測定

3.1 原 理

本提案測定法は、式(1)を構成する各最適パラメータをGAを用いて推定する測定法である。高調波ひずみ率に必要なパラメータは A_n のみであるが、測定信号の遅延を考慮するため ϕ_n の推定も必要となる。しかし測定角周波数 ω_n は既知であるので、推定すべきパラメータは各成分当り A_n , ϕ_n の二つとなる。パラメータ推定は、式(1)で A_n , ϕ_n により得られる一定長の推定正弦波信号と、同じ長さのスピーカ出力信号との二乗平均誤差を用いて求める。二乗平均誤差が最小のときの A_n , ϕ_n が最適パラメータであるので、二乗平均誤差をGAの評価関数にすることで誤差を評価値として用いることができる。信号パワーは、 A_n の最適値から求められる。他にGAを波形信号のパラメータ推定に適応している例として、正弦波騒音の能動騒音制御における騒音のパラメータ推定[4]や、声道インパルス応答を複数の減衰正弦波積和としたインパルス応答のパラメータ推定[5]などがある。

本提案法は、推定パラメータが二つのみであることから、GAにより短時間で適応度の高いパラメータを

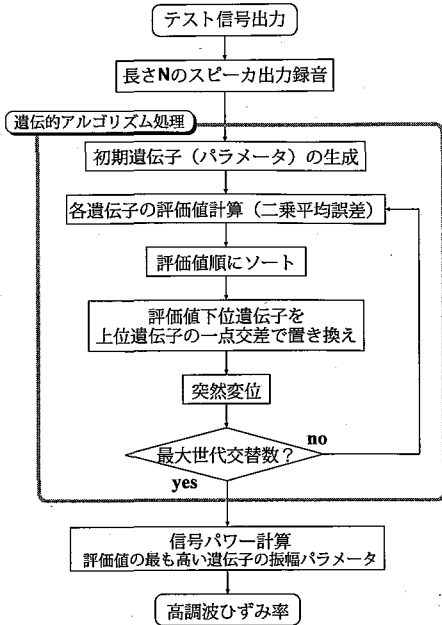


図1 提案測定アルゴリズム

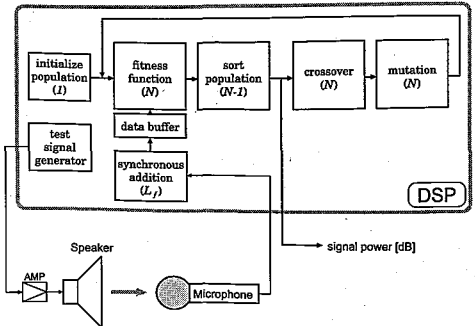
Fig.1 Algorithm of the proposed measurement system.

推定でき、また遺伝子表現が単純であることやアルゴリズム的に処理の分割・並列化しやすいことから、DSP への実装や専用ハードウェアとしての実装も容易であるものと考えられる。

3.2 提案測定アルゴリズム

本提案測定法のアルゴリズムを図1に示す。本提案測定法は、はじめにテスト信号により駆動されたスピーカ出力から基本波成分周期分の長さをバッファに保存し、そして保存データを用いGAにより推定信号の最適パラメータを求める。本提案法におけるGA部は、以下の遺伝子表現、遺伝子操作を実装する。

- 遺伝子表現: A_n , ϕ_n とも長さ16のビットストリング
- 推定信号: $v_{(est)} = A_n \sin(n\omega t + \phi_n)$
- 評価関数: スピーカ出力と推定信号の二乗平均誤差。誤差がパラメータの評価値となる
- 遺伝子操作: エリート戦略。評価値順にソートした遺伝子のうち、下位の遺伝子があらかじめ設定した淘汰割合だけ淘汰される。新たな遺伝子は、残った上位の遺伝子からランダムに二つを選択し、ランダムに決定した交差位置による一点交差により生成される。
- 終了条件: あらかじめ設定した世代交代数

図2 本提案測定システムの DSP への実装
Fig.2 Implementation of the propose system in DSP.

本提案測定法での遺伝子表現・操作は、安価な DSP へ実装することを考慮して決定している。

3.3 DSP への実装

実時間測定のために、測定アルゴリズムの DSP への実装は測定時間や操作の点で有用である。本提案測定法を DSP へ実装するために本論文では、図2のように GA における一世代の処理をサンプリング時間内に収まる程度に分割し、複数サンプリング時間で一世代の処理を行う方法を提案する。

DSP 内では、図2の各ブロックが矢印の順に実行され、マイクロホン出力の保存と初期遺伝子の生成の後には遺伝的アルゴリズム処理を順に繰り返す。各ブロック内の括弧内の記号は、各ブロックが処理に要するサンプリング回数であり、 N は遺伝子数、 L は保存データ長である。図2は1サンプリング当りの評価値算出を1遺伝子のみとした場合で、ソートの所要回数は単純ソートの場合である。以上から、サンプリング周波数 f_s 、世代交代数 G_{max} とすると、本提案システムによる測定時間は式(3)となる。

$$\text{測定時間} = \frac{1 + L + G_{max}(4N - 1)}{f_s} \quad [\text{秒}] \quad (3)$$

3.4 提案測定法の問題

3.4.1 初期値の影響

GA では、推定パラメータが初期値に依存し局所解に陥る危険性がある。その改善法として、遺伝子操作にエリート戦略と他の選択法を組み合わせる方法が用いられることが多い。しかし、本提案測定法では DSP への実装を考慮しエリート戦略のみを用いるため、測定性能に悪影響を与える可能性がある。

3.4.2 スピーカ出力の安定性

本提案測定法は、短時間スピーカ出力信号から高調

波ひずみ率を推定するため、従来の測定法に比べスピーカ出力の不安定性や外部雑音などの影響を受けやすいものと考えられる。本提案測定法では、測定信号と推定信号の間の二乗平均誤差を求める信号長を基本波周波数の整数倍の長さに設定し、時間領域で同期加算することにより外部雑音に対する SN 比を向上させている。

4. 実 験

4.1 測定条件

本提案測定法の性能評価のため、同じ条件下で本提案法、スペクトル解析法、適応フィルタ法 (LMS, DXHS) それぞれの方法で測定を行い、測定精度及び測定時間を求めた。測定実験は、本研究室所有の簡易無響室で行った。無響室の暗騒音は約 40 dB(C) である。

表 1 に測定条件を示す。遺伝的アルゴリズム条件における各パラメータ値は、事前の予備実験により決定した値である。また、測定場所、使用スピーカ、テスト信号周波数、スピーカ・マイクロホン間距離を除き、スペクトル解析法、適応フィルタ法の各測定条件は文献 [2] と同じである。

表 1 測定条件
Table 1 Measurement condition.

使用機器	
スピーカ SP	BOSE 101MM
マイクロホン MIC	B&K Hand-held Analyzer Type 2250
DSP 機器	PCI-DSPIO67 及び I/O ボード (株) コーメックス電子)
スピーカ性能	
インピーダンス	6 Ω
再生周波数帯域	70 Hz ~ 17 kHz
感度	86 dB/W/m
許容入力	45 W rms (IEC268-5), 150 W rms (peak)
測定条件	
サンプリング周波数 f_s	16000 Hz
テスト信号周波数 f_1	500 Hz, 1000 Hz, 1600 Hz
測定高調波	第 2 次 ~ 第 5 次
SP・MIC 間距離 D	1 m
テスト信号レベル	90 dB(C)
遺伝的アルゴリズム条件	
遺伝子数 N	30
染色体長 M	16
選択	エリート戦略
交差	一点交差
淘汰確率	0.3
突然変異確率	0.15
世代交代数 G_{max}	200
二乗平均信号長 L	$5 \times f_s / f$
同期加算数	30

4.2 測定結果

4.2.1 測定精度

本提案法の測定精度の検証のため、本提案法 (以下 GA 法)、及び FFT を用いたスペクトル解析法 (以下 FFT 法)、LMS, DXHS 各々を用いた適応フィルタ法 (以下 LMS 法, DXHS 法) により同じ条件下で測定を行った。また本提案法では、3.4 の理由により測定値が局所解に陥る可能性があるため、同じ条件での測定でも従来測定法に比べて測定ごとに測定値がばらつく可能性が予想された。そこで GA 法では、同じ条件で 100 回測定したときの基本波及び高調波成分の測定値のばらつきも求めた。

はじめに、GA 法及び FFT 法, LMS 法, DXHS 法での $f_1 = 500$ Hz, 1000 Hz, 1600 Hz の場合の測定結果を表 2 に示す。表 2 では、従来法である FFT 法の測定値を基準値と定め、基準値との誤差が ± 1 dB 未満の測定値を太字で、また誤差が ± 1 dB 以上 ± 3 dB 未満の測定値を下線で示している。また、GA 法 1 は GA 法により 100 回測定した 1 回目の測定値、GA 法 2 は 100 回測定して得られた最頻値である。本実験で用いた測定機器での測定可能ひずみ率範囲は、0 dB ~ 約 -63 dB 程度である [2]。FFT 法で測定可能範囲内の測定値が得られた高調波成分について見ると、LMS 法, DXHS 法では FFT 法と同等の精度で測定されている。GA 法では、GA1 法 1 に比べ GA 法 2 の方が基準値に近い測定値が得られ、 $f_1 = 500$ Hz の第 5 次高調波成分以外は、GA 法 2 ではほぼ基準値どおりのひずみ率が測定されている。

次に、 $f_1 = 1000$ Hz で GA 法により 100 回測定し

表 2 測定結果
Table 2 Measurement result.

f_1 [Hz]	測定法	高調波ひずみ率 [dB]			
		2 次	3 次	4 次	5 次
500	FFT 法	-36.78	-34.75	-57.11	-63.10
	LMS 法	-36.78	-34.88	-56.78	-65.68
	DXHS 法	-36.58	-34.78	-57.78	-62.78
	GA 法 1	-35.37	-34.41	-58.16	-61.07
	GA 法 2	-35.38	-34.69	-55.71	-57.02
1000	FFT 法	-47.63	-47.56	-68.59	-59.64
	LMS 法	-47.68	-47.23	-68.48	-61.98
	DXHS 法	-47.66	-47.26	-67.76	-60.86
	GA 法 1	-48.22	-47.71	-64.22	-72.52
	GA 法 2	-46.82	-46.76	-72.66	-60.03
1600	FFT 法	-61.35	-56.49	-66.31	-
	LMS 法	-62.84	-57.04	-60.54	-
	DXHS 法	-62.60	-57.10	-60.70	-
	GA 法 1	-70.73	-56.50	-73.65	-
	GA 法 2	-64.24	-56.30	-73.65	-

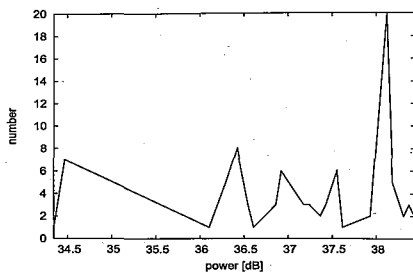


図3 測定パワー値の分布 ($f_1 = 1000$ Hz, 第2次高調波)
Fig.3 Distribution of measured signal power. ($f_1 = 1000$ Hz, 2nd harmonic)

表3 GA法での測定値のばらつき ($f_1 = 1000$ Hz, 測定回数: 100回)
Table 3 Dispersion of measured power. ($f_1 = 1000$ Hz, number of measure: 100)

	測定パワー値 [dB]				
	1次	2次	3次	4次	5次
最小値	84.94	34.34	34.48	-1.51	-1.51
最大値	84.97	40.63	40.64	23.10	28.87
平均値	84.94	37.64	37.93	12.00	23.15
最頻値	84.94	38.15	38.21	12.40	25.07
標準偏差	0.011	1.560	0.925	5.820	6.017

たときの測定結果について、第2次高調波ひずみ率の頻度分布を図3に、また各高調波成分の最小値、最大値、平均値、最頻値及び標準偏差を表3に各々示す。GA法では、図3、表3のように測定値のばらつきが確認できる。しかし第2、第3高調波ひずみ率のように、本実験機器で測定可能な最小ひずみ率よりも大きいひずみでは、標準偏差を見てもばらつきは小さくほぼ同じ測定値が得られた。しかし、最小ひずみ率付近である -60 [dB] 以下になると、測定値は基準値付近に収束するものの測定値のばらつきが大きい。本提案測定法は、1回のみの測定における測定可能な最小ひずみ率に近い高調波ひずみに対する信頼性は従来測定法に比べて低い、同じ状態で多数測定してその平均値または最頻値を求めるといった方法により信頼性を向上することができる。

4.2.2 測定時間

適応フィルタを用いた測定法では、測定パワー値が収束するのに時間を要するという問題があった。図4に、GA法、LMS法、DXHS法、FFT法について $f_1 = 1000$ Hz, 第2次高調波成分での測定パワー値の収束特性を示す。GA法は、世代交代数2000まで増やして示している。図4より、GA法は測定に1秒程度要するのに対し、LMS法、DXHS法では15秒程度

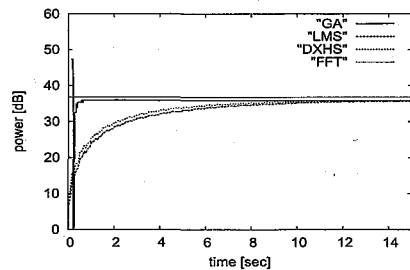


図4 測定値の収束特性 ($f_1 = 1000$ Hz, 第2次高調波)
Fig.4 Convergence of measurement power. ($f_1 = 1000$ Hz, 2nd harmonic)

要しており、GA法の方が大幅に短い時間で測定できている。FFT法との測定時間の比較は難しいが、本実験でのFFT法の条件（時間窓長16384、同期加算10回）では約10秒分の信号データが必要になり、FFT法と比べても十分に短い時間で測定できている。

5. むすび

本論文では、スピーカの高調波ひずみ率測定時間の短縮を実現するため、遺伝的アルゴリズムを用いてスピーカ信号中の基本成分及び高調波成分を推定する測定法を提案し、測定実験により提案測定法の測定精度、測定時間の評価を行った。

DSPを用いた測定実験により、本提案法では高調波ひずみ率が小さい場合には測定値に誤差が発生しやすくなる問題があるものの、 -60 dB程度までの高調波ひずみ率については従来測定法と同様の精度での測定が可能であることが確認でき、また従来の測定法と比べて大幅に短い時間で測定できることを確認した。

文 献

- [1] R.C. Cabot, "Fundamentals of modern audio measurement," J. Audio Eng. Soc., vol.47, no.9, pp.738-762, 1999.
- [2] 藤岡豊太, 永田仁史, 安倍正人, "適応フィルタを用いたスピーカの高調波ひずみ率測定システムと実時間実験による性能評価," 信学論 (A), vol.J92-A, no.2, pp.71-83, Feb. 2009.
- [3] IEC 60268-5, "Sound system equipment — Pt.5: Loudspeakers," May 2003.
- [4] J.C. Werner, J.S. Junior, R.G. Lima, and T.C. Fogarty, "Active noise control in ducts using genetic algorithms," 2002 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, vol.1, pp.243-254, 2002.
- [5] 米山正秀, 古森浩一, 中村尚五, "ハイブリッドGAによる声道インパルス応答の推定," 音響誌, vol.55, no.12, pp.821-831, 1999.

(平成22年3月26日受付, 5月7日再受付)