

一般調和解析(GHA)を用いた SP レコード再生音の雑音抑圧の検討

高見澤 龍児[†] 片山 健司[†] 神田祥宏[†] 村岡 輝雄[‡]

[†] 武蔵工業大学 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

E-mail: [†] g0463059@eng.musashi-tech.ac.jp, [‡] t-muraoka@bea.hi-ho.ne.jp

あらまし SP レコードは、歴史的価値や希少価値の高い名演奏が数多く存在し、現在では複製版として CD 化されているものもある。しかし、SP レコードは材質上の問題で溝が欠損しやすいことから再生音に非常に耳障りな雑音が重畳し、保存状態によって雑音の酷いものに関しては雑音抑圧を行わずにそのまま CD 化している現状である。

本論文では、高い雑音抑圧効果が期待される一般調和解析(GHA)を用いて SP レコード再生音の雑音抑圧を行った。しかし、雑音抑圧後の信号には Musical Noise が発生する。そこで筆者らは、その Musical Noise 発生の原因を解明し、新たな改良案として「多段 GHA」を提案することにより、Musical Noise の発生を抑えながらより満足できる雑音抑圧が達成できた。

キーワード 一般調和解析(GHA)、多段 GHA、雑音抑圧、SP レコード

Scratch Noise Reduction of SP record utilizing Generalized Harmonic Analysis (GHA)

Ryuji TAKAMIZAWA[†] Kenji KATAYAMA[†] Yoshihiro KANDA[†] Teruo MURAOKA[‡]

[†] Musashi Institute of Technology 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557 Japan

E-mail: [†] g0463059@eng.musashi-tech.ac.jp, [‡] t-muraoka@bea.hi-ho.ne.jp

Abstract A lot of excellent performances with high historical value and scarcity value exist in the SP record, and there is the one made CD as a reprint version now, too. However, the SP record is a current state that the ditch is superimposed from loss to the reproduction sound by a very jarring noise, doesn't suppress the noise of the problem on the material by the state of preservation for the one with a cruel noise, and made CD as it is.

In this thesis, the noise of the SP record reproduction sound was suppressed by using general harmony analysis (GHA) that a high effect of the noise suppression expected and is bright. However, Musical Noise is generated in the signal after the noise is suppressed. Then, authors succeeded in more advanced noise suppression while suppressing the generation of Musical Noise by clarifying the cause of the Musical Noise generation, and proposing "Multistep GHA" as a new improvement idea.

Keyword Generalization harmonic analysis, Multistep GHA, Noise suppression, SP record

1. はしがき

1888年のBerlinerによるSPレコードは、LPレコード登場までの60年余り人類の貴重な録音メディアの地位にあり、今日、歴史的な名演奏を記録した貴重な文化遺産として受け継がれている。これらSPレコードは粒子の粗い材料で作られていたため雑音が多く盤面が損傷し易いとの欠点のために、今日残っているSPレコードは音溝が傷んで更に雑音が増加し演奏の鑑賞に支障のあるものが多い。これらSPレコードの雑音は今日のデジタル録音等に比べると桁違いに大きいので、その低減は非常に困難である。

筆者らは、非定常信号の処理に適した一般調和解析(Generalized Harmonic Analysis: GHA)[1]を用いて、SPレコードの雑音低減に取り組んだ。

2. GHA の概要

GHAは1958年にN.Wienerが提唱した、次式で示される拡張された調和解析(Fourier級数展開)の概念である。

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

この概念は、記述に用いる正弦波周波数間の調和関係は必要なくなり非調和解析が可能であるが、STFTの様な信号処理に必須な短時間分析には適合しない。近年のGHAアルゴリズム研究はその実現を指向しており、本論文でも以降は“GHA”を“短時間GHA”の意味で用いる。

GHAはある分析フレームで切り出された信号 $x_0(t)$ を次式の様に正弦波の線形和で表現する。

$$x_0(t) \cong \sum_{k=1}^K A_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (2)$$

この式は STFT による周波数分析と同形式であるが、各々の周波数が非調和関係にあるのが決定的に異なる。式中の、 A_k 、 ω_k 、 ϕ_k は各正弦波の振幅、周波数、位相であり、それらを解析的に求めるのは至難である。

1994 年に平田はそれらのパラメータを逐次探索によって求める、世界初の GHA アルゴリズムを発表した[2]。このアルゴリズムは、先ず A_T 、 ω_T 、 ϕ_T をパラメータとする雛型の正弦波(テンプレートと呼ぶ) $T(t)$ を設定し、第一段階($k=1$)では次式のようにテンプレートと被分析信号との残差エネルギー E_1 を求める。

$$E_k = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \{x_0(t) - T(t)\}^2 dt \quad (3)$$

この状態でテンプレートの A_T 、 ω_T 、 ϕ_T を変化させると E_1 が最小になるので、そこでの正弦波を第一段階の周波数成分 $S_1(t)$ として確定する。第二段階($k=2$)では $x_0(t)$ から $S_1(t)$ を差し引いた残差信号 $\varepsilon_1(t)$ に同様な手続きを施して第二段階の周波数成分 $S_2(t)$ を確定し、以下同様な手順で $S_3(t)$ 、 $S_4(t)$ 、 \dots を確定すれば、(2)式の分析結果が得られる。ここで述べた GHA の分析段階を分析次数と呼ぶ事にする。

分析の流れから明らかな様に GHA は対象信号の周波数成分を大きい順に確定して行くので、例えば対象信号の周波数成分が Fig.1(左)のようになっていれば、図中の番号に従って確定される。

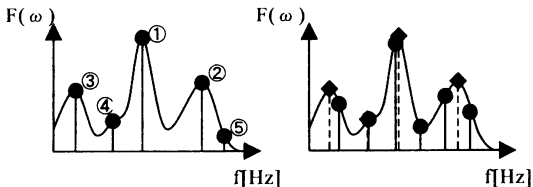


Fig.1 GHA の分解能(左)と FFT の分解能(右)

他方、STFT は分析窓幅で決まる基本周波数 ω とその整数倍の正弦波による Fourier 級数展開なので同じ対象信号を Fig.1(右)の様に表示し、そこで多くの周波数成分が用いられるにも拘わらず必ずしも対象信号の周波数成分とは一致せず、本来含まれていない周波数成分が多数発生する事になる。

同じ個数の正弦波を用いる場合、GHA の方が信号再合成の精度に優る事が明らかである。GHA は当初は長い分析を要し、実用的ではなかったがその後の工夫によって実用レベルに到達している[3][4]。GHA による SP レコードの雑音低減は以前にも試みられた事

があるが[5]、筆者らは GHA の信号と雑音の分離能力に着目して、対象信号の音質を損なわない様な SP レコードの雑音低減への応用を試みた[6]。

3. SP レコードに対する雑音低減手法

3.1. SP レコードにおける雑音の性質

SP レコードは円盤上の音溝を再生針が辿り、音溝の偏移を検出して記録された信号波形を検出するので音溝壁面の粗さや傷が雑音になる。SP レコードの再生波形は例えば Fig.2 の様になっており、図中でパルス状に見えるものが音溝の傷に由来する Pop noise、また不規則波形に見えるものが音溝表面の粗さに起因 Scratch noise であり、各々次の様な性質を有する。

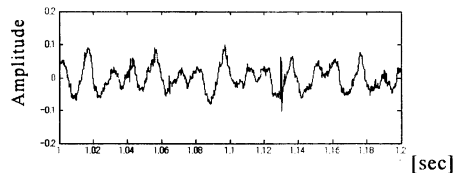


Fig.2 SP レコード再生波形

- ① Pop noise: 振幅が非常に大きく、音溝の位置(例えばレコードの内周と外周)によってパルス幅が異なる。
- ② Scratch noise: 本来は不規則雑音であるが、音溝の位置によってスペクトラムが異なる。

この様な雑音の非正常さのために、従来の雑音低減手法では十分な対応が出来ない。

3.2. 雑音低減の手法

従来の雑音低減手法には次の三つがありそれらの概略は以下の通りである[7][8]。

- ① Bandpass-Filter Application (BP 法と呼ぶ事にする)
- ② Noise Gate (NG 法と呼ぶ事にする)
- ③ Spectrum Subtraction (SS 法と呼ぶ事にする)

① BP 法

帯域フィルタにより信号の周波数成分のみを残して雑音成分を除く方法である。雑音成分が大きい場合は帯域フィルタの条件設定が難しく、信号の一部が欠損したり信号中の残留雑音が影響して音質が大幅に劣化する。

② NG 法

雑音レベル付近に域値を設定し、域値以下の信号のレベルを下げるものである。雑音レベルが大きい場合はこの操作に伴う信号のレベル変動が不自然に聞え、演奏の弱音箇所も損われ音楽鑑賞には適さない。

③SS法[5]

この方法はオーディオ分野では1985年に No Noise System として実用化されたが、今日では使用されていない。その原理は周波数領域で雑音低減を行なうものであり、予め信号の無音部分の雑音サンプルがある分析窓で DFT 分析しておき、対象信号を同じ分析窓で切り出してそれに DFT を施したもから減算した後 IDFT を施して対象信号に戻すものである。したがって DFT による対象信号及び雑音サンプルは本来の周波数成分とは異なる ω およびその整数倍の周波数の正弦波の集合で表現されるので、そこで減算処理を行なって IDFT を施せば対象信号本来の周波数成分の振幅と位相に誤差が生じ、対象信号に含まれない周波数成分が混入する事になる。この副作用は対象信号中の雑音レベルが十分に小さい場合を除き、以下の深刻な障害をもたらす。

- ◎Breathing の発生：分析窓長を周期とする変調現象が生じ、原音が「シュワシュワ」した音に変わる。
- ◎Musical noise の発生：対象信号に存在しない周波数成分が混入して「ピロピロ」した雑音が聞える。

以上の欠点のために現在では高音質を目指す音響信号に対してこれらの手法が用いられる事はなく、SP レコードに対してはその雑音の非定常性ゆえにこれらの副作用は一層深刻になる。

3.3. GHA による雑音低減

先述の様に GHA は対象信号の周波数成分を大きい順に確定するので、例えば Fig.3 に示す様に雑音成分を含む対象信号は、GHA による正弦波と残差信号の分離が進む過程で雑音成分は主に残差信号に含まれる様になる。従って分離された正弦波のみで信号を再合成すれば雑音が低減される。

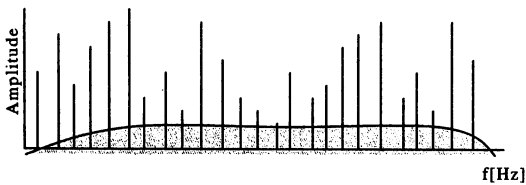


Fig.3 雑音成分を含む対象信号

ここで重要になるのは GHA の分析次数(=分離正弦波数)の設定であり、次数が小さければ分離正弦波数が少ないので雑音は有効に除去されるが再合成された信号の忠実度(音質)は大きく損なわれ、次数が大きければ再合成信号の忠実度は十分であるが雑音が残留する。最適な分析次数は対象信号の内容、雑音混入の程度によって多種多様なので雑音低減処理を行なうオペレータの感性に委ねざるを得ないが、GHA では前述の副作用

用が生じ難いので対象信号の音質を損なわない雑音低減が可能である。

3.4. Wavelet 変換による前処理

3.1 で述べたレコードの音溝の傷に由来する Pop noise は原理的には GHA によって除去可能であるが、振幅が非常に大きいので容易ではない。そこでパルス性雑音除去に適した Wavelet 変換処理を前処理に用いて Pop noise を除去する事にした。この処理法は公知なので概略に留めるが[9]、Wavelet 変換 $W(a,b)$ は次式の様に被分析信号 $x(t)$ と基底関数 $\psi(t)$ との convolution で与えられる。

$$W(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

パルス性雑音を含む被分析信号に Wavelet 変換を施すと、各レベルの分析結果が得られる。ここではあるレベルにパルス性雑音が反映されているので、これがある域値で制限して Wavelet 逆変換を施すとパルス性雑音は抑圧される。

実際の Pop noise 除去に際しては、音楽中の打楽器の様な衝撃的な音の品質を損なわない様にカット & トライで域値をセットした。以降は Wavelet 変換による前処理に続いて GHA による雑音低減を行うものとする。なお使用した基底関数は Spline-Wavelet である。

4. 予備実験

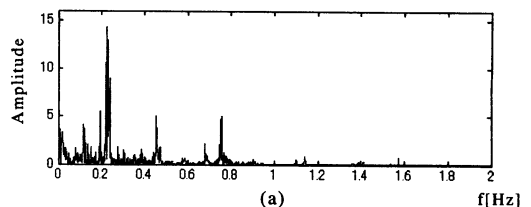
筆者らの研究は MATLAB 言語によるパソコン環境で行なった。以降の処理における各信号のデジタル化仕様は次の通りである。

- ・ 標準化周波数 44.1 KHz
- ・ 量子化数 16 bit
- ・ 信号の種類 モノラル

予備実験として、同じ曲の同一箇所を採取した 2 種類の信号 A、B に対して雑音低減を行なった。

- ①信号 A：10 秒の CD 音源に白色雑音を重畳
- ②信号 B：10 秒の SP レコード音源

信号 A に対する予備実験の結果は Fig.8 に、信号 B に対する予備実験結果のそれらを Fig.9 に示す。



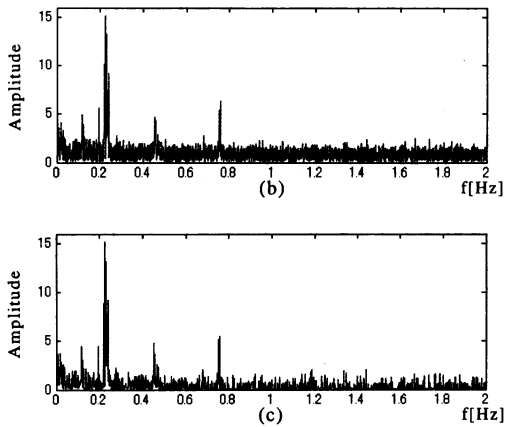


Fig.4 信号 A の原音源のスペクトル(a)と信号 A のスペクトル(b)に GHA を施した結果のスペクトル(c)

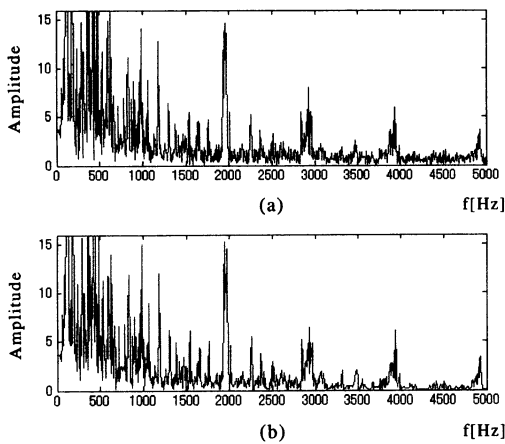


Fig.5 信号 B のスペクトル(a)に対して GHA を施した結果のスペクトル(b)

Fig.4 において(a)は原信号,(b)は雑音を加えた信号,(c)は GHA による雑音低減を施した信号,また, Fig.5 においては(a)は SP レコードの再生信号,(b)は(a)に雑音低減を施した信号である。ここでは経験に基づき GHA による分析次数を 300 としており,双方の実験結果から雑音低減効果がみとめられる。聴感的には必ずしも十分ではない。これは GHA による雑音低減の過程では先述の Breathing の発生はなかったが, Musical noise が時折聞かれたので,その軽減のために分析次数を増やし,結果的に残留雑音が増加したからである。

5. 多段 GHA による Musical noise の低減 多段 GHA の導入

音楽信号を経時的に観察すれば,スペクトルが密な部分と疎な部分がある。Musical noise がスペクトルが

疎な部分で発生するのであれば,その部分での分析次数を減らせば良い。しかしながら,雑音が混入している信号成分に対する被分析信号のスペクトル疎密の自動判定は困難である。

いま, Fig.6 中の(1)に示す様に雑音の混入した被分析信号を N サンプルずつ区間①, ②, ③に区切り,その区間内のスペクトルが(2)の様に密,疎,密になっているものとしよう。この状態で分析次数の大きい GHA を施せば(3)に示す様に区間②においては雑音中より不要正弦波を分離するので,(4)に示す様に再合成信号中の区間②において Musical noise が発生する。

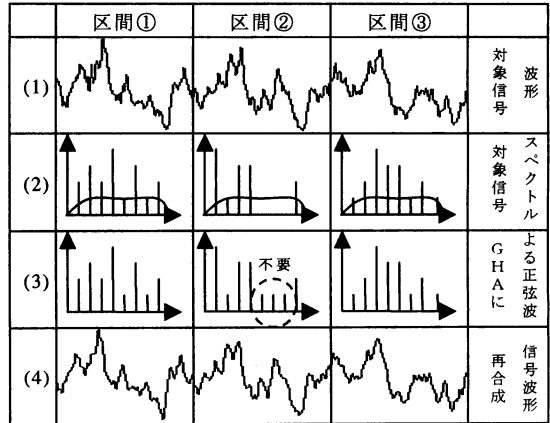


Fig.6 GHA 処理(分析次数-大)

そこで Fig.7 の(3)に示す様に,区間②において Musical noise の発生しない範囲に分析次数を制限すれば,(4)に示す様に再合成信号の波形が劣化して全体的に音質が不鮮明になる。その一方では(5),(6)に示す様に残差信号中に対象信号の周波数成分が多く残存する様になる。

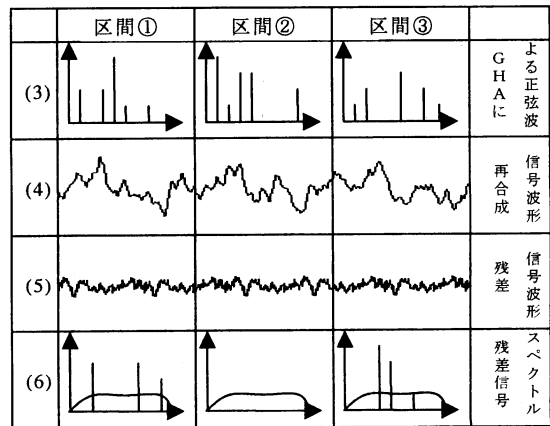


Fig.7 GHA 処理(分析次数-小)

従って残差信号に更に GHA を施して必要な正弦波を分離して Fig.7 の(3)に追加すれば再合成波形の劣化が回復し音質改善が期待されるが、区間毎にその要否を判定するには処理時間の観点から現実的ではない。そのために、Fig.7 の(5)に示す残差信号に対して Fig.8 の(5')の様に区間①と区間②を合体した区間①'、更に同様に区間③と区間④を合体した区間③'の様に長さが2倍の区間に区切り直せば、例えば区間①'のスペクトルは Fig.8 の(6')のようになる。

この様にして得られる区間①'、区間③'、区間⑤'、・・・と続く残差信号に対して Musical noise が発生しない範囲の分析次数の GHA を施せば、Fig.8 の(7)の様な正弦波群が得られる。この区間①'の正弦波群を Fig.8 の(3')の区間①と区間②の正弦波（これは Fig.7 の(3)に示すものと同じ）に加算し、同様に区間③'の正弦波群を区間③と区間④の正弦波への加算を行う・・・の処理によって Fig.8 の(3'')の様に全区間の正弦波の埋め合わせを行う。

その結果再合成された信号は、Fig.8 の(4')の様に区間①や区間③の様に本来の正弦波数が多い場所では正弦波数が所定の数に近づいて波形の劣化が回復し音質が改善される。また、区間②では直前の区間の正弦波が埋め込まれて再合成信号の波形は多少の差異は生じるが、埋め込まれる正弦波は対象信号に含まれる周波数成分の一部であり持続時間が1区間分(数十 msec)長くなるのみなので聴覚的には知覚されず、結果的に Musical noise 発生なしでの高音質な雑音低減が達成される。そして更に音質改善が必要な場合にはこの段階の残差信号に対して更に区間長を4倍にして同様な処理を施せば良い。

この手法は区間長の異なる複数の GHA をシリーズに施す事になるので「多段 GHA」と名付ける事にし、そのフローは Fig.9 の様になる。

多段 GHA における段数や、各段階における分析次数は被分析信号の内容や雑音の混入状態により一義的に決まらないので、現状ではカット&トライで最良点を決めている。

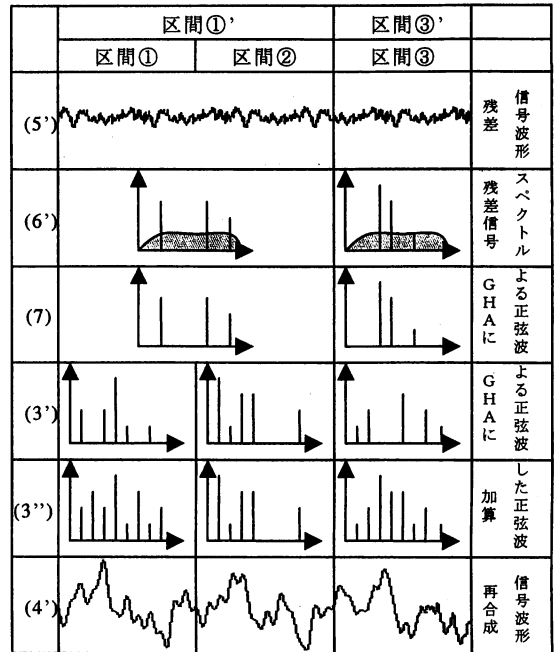


Fig.8 多段 GHA 処理

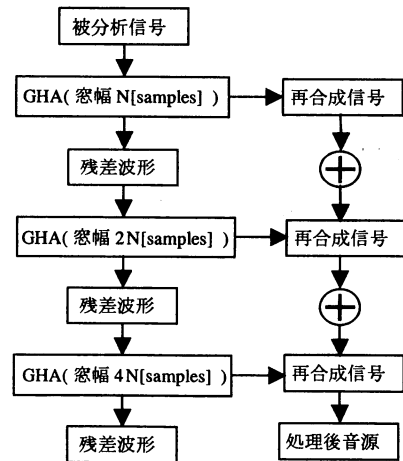
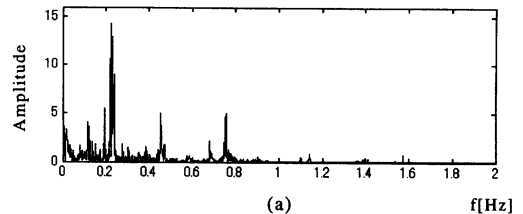


Fig.9 多段 GHA のフロー

先の予備実験で用いた信号 A, B に対して多段 GHA による雑音低減を行った結果を、Fig.10 及び 11 に示す。



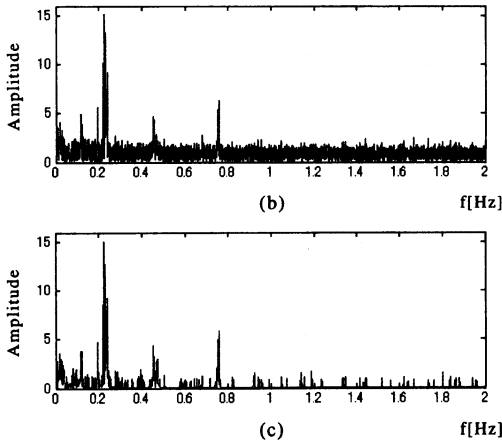


Fig.10 信号 A の原音源のスペクトル(a)と信号 A のスペクトル(b)に GHA を施した結果のスペクトル(c)

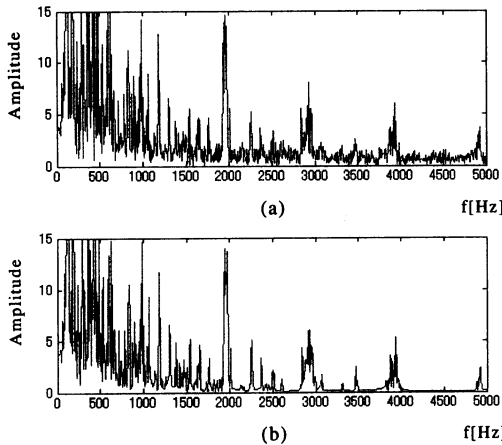


Fig.11 信号 B のスペクトル(a)に対して GHA を施した結果のスペクトル(b)

各部における(a)(b)(c)等の内容は先の Fig.4 及び Fig.5 におけるものと同じであり, Fig.4 と Fig.10, Fig.5 と Fig.11 を比較すれば, 多段 GHA による雑音低減効果の改善が明らかである.

そこで信号 A に関する原信号の復元を検証する. 信号 A における白色雑音重畳前の信号を $x(t)$, 信号 A から GHA によって雑音を除去して復元した信号を $\hat{x}(t)$ とし, その復元度を次式で定義する.

$$10 \log_{10} \frac{\sum \{\hat{x}(t)\}^2}{\sum \{x(t)\}^2} [dB] \quad (5)$$

今回の実験では分析フレーム長 N を 4096 サンプルとし, さらに多段 GHA では第 1 段階の分析次数 n_1 を 30, 第 2 段階の n_2 を 100 としているが, 得られた各復

元信号の実測値を(5)式に当てはめると, GHA では -27.2dB, 多段 GHA では -1.9dB となっていて復元度の良好さが明らかである. また, 聴感的にも Musical noise のない満足すべき音質が得られている. 信号 B に関してはやはり $N=4096$ とし, 多段 GHA では $n_1=30, n_2=150, n_3=100$ としているが, 原信号の状態が不明なので(5)式による評価ができないものの, Musical noise の発生なしに雑音の低減された音楽を楽しむ事が可能になっている.

6. まとめ

本文において非調解析法 GHA がその周波数成分の記述の精度の良さによって雑音低減に有効であることを示し, その発展形である多段 GHA が特に雑音の多い SP レコード再生音に対して著効を発揮する事を明らかにした. 雑音低減の為のパラメータ設定は低減対象になる音楽の性質や混入している雑音の状況によって, 現状ではカット&トライによらざるを得ないが, 今後多くの事例に本手法を適用してノウハウの体系化と自動化を目指したいと考えている. 冒頭でも述べた様に歴史的に価値がある損傷した音源の修復は社会的意義が大きいので, 本手法が貢献できる様に改良を続ける所存である.

文 献

- [1] N.Wiener, "The Fourier Integral and Certain of its Applications," Dover, 1958
- [2] J.S.Lima and A.V.Oppenheim, "Enhancement and Bandwidth Compression of Noisy Speech," Proc.IEEE, Vol.67, No12, pp.1586-1604(1979)
- [3] Jhon M.Eargle, "ハンドブック・オブ・レコーディングエンジニアリング," 株式会社ステレオサウンド
- [4] 日本音楽スタジオ協会編, "サウンドレコーディング技術概論," 兼六館出版(2001)
- [5] C MAGAZINE pp.52-59(1998)
- [6] E.B.George and M.J.T.Smith, "Analysis-by-Synthesis/Overlap-Add Sinusoidal Modeling Applied to The Analysis and Synthesis of Musical Tones," J.Audio Eng. Soc., 40, (6), pp.497-516, June 1992
- [7] T. Terada, H. Nakajima, M. tohyama, and Y. Hirata, "Nonstationary waveform analysis and synthesis using generalized harmonic analysis," IEEE TF/TS Symp., pp.429-432, 1994
- [8] 平田能睦, 小池恒彦, "一般化調解析を用いた音声帯域圧縮法," 信学技法, EA98-61, pp.17-24, 1998
- [9] 村岡輝雄, 桐生伸也, 神田祥宏, "高精度・高速な一般化調解析(GHA)アルゴリズム," 高速信号処理応用技術学会講演論文集, pp19-24(2004)
- [10] 村岡輝雄, 片山健司, "一般化調解析とウェーブレット変換を併用した音溝の傷んだ SP レコードの雑音低減の検討," 日本音響学会講演論文集, pp559-560(2003)
- [11] 山岡憲二, 大石耕史, 及川靖広, 村上輝生, 山崎芳男, "SP レコードのシグナルエンハンスメント" 日本音響学界講演論文集, pp591-592(2001)