

高忠実度オーディオ記録・再生

- 高速1bit信号処理 -

山崎芳男, 及川靖広

早稲田大学理工学総合研究センター

〒169 新宿区大久保3-4-1, E-Mail: yamasaki@acoust.rise.waseda.ac.jp

内容概要: 一般に標本化周波数が帯域を決定し量子化ビット数がダイナミックレンジをそれぞれ独立に決定するかのようにつけとられがちであるが, 実は両者は密接に関係しており重要なのは両者の積, すなわち伝送容量である. 量子化雑音のスペクトル分布を制御することにより, 1bit量子化でも十分なダイナミックレンジを得ることが可能であり, 我々は100kHzまで数十dBのダイナミックレンジで伝送可能な高速1bit符号化を提案しさまざまな信号処理に応用してきた.

ところで, 周波数分析にはFFTがよく用いられているが, FFTには窓の影響を受け偽の周波数成分が出るなどの問題点がある. 1958年にウィナーが提案した一般化調和解析は, 周波数成分を一本ずつ抽出していくことにより周波数解析を行う手法で, 窓の影響を受けずに解析できる. 本報では, 高速1bit符号化による音響信号の高忠実度記録・再生, および正確な周波数解析が可能であるという一般化調和解析の利点に着目した高能率符号化について報告する.

1. まえがき

アナログ信号のデジタル化において標本化周波数が帯域を決め, 量子化ビット数がダイナミックレンジを決定すると捉えられがちであるが, 標本化周波数と量子化ビット数は密接な関係をもっており個々に論じられるものではない. 重要なのは両者の積, すなわち伝送容量である. 標本化周波数と量子化ビット数の組み合わせの選択が困難であるのならばいっそその片方の極限である高速標本化1bit量子化で信号の情報量と人間の聴覚特性に見合った符号化方式が可能なのではないかと検討を加えてきた. 具体的には, 量子化器を帰還ループ内に設けることにより量子化雑音のスペクトル分布を可聴帯域外に押しやり, 通常の系を同等の500k ~ 1Mbit/sの伝送容量, すなわち500k ~ 1MHz標本化で1bit符号化が可能であることを明らかにし, さらにその2 ~ 8倍の標本化周波数で標本化を行う系を構築し様々な信号処理を提案してきた^{(1),(2),(3)}. (図-1)

MPEGなどの人間の聴覚特性を利用した高能率符号化では, 標本化周波数が32 ~ 48kHz, 量子化ビット数が12 ~ 16ビットの通常のマルチビット信号が音源として用いられている. しかし, この現行の標本化周波数および量子化ビット数は必ずしも人間の聴覚特性に馴染むものではない. 広帯域, 広ダイナミックレンジであるという高速1bit信号の特徴から, 高速1bit信号を入出力とした高能率符号化システムは伝送容量を節約したうえ質の高い符号化も可能であり, さまざまな音質の符号化に対応できるという点でも高速1bit信号は通常のマルチビット信号より適していると考えられる.

ところで, 周波数解析にはFFTがよく用いられているが, FFTでは窓の影響を受け偽の周波数成分を得ることがある. これは窓長を周期とする周期的な信号として信号を解析するた

めである。一方、1958年にウィナーが提案した一般化調和解析は、周波数成分を一本づつ抽出していくことにより周波数解析を行うという信号処理の原点に立ち戻った方法である。信号は窓の影響を受けることなく解析される。東山、平田らは一般化調和解析を用いピアノ音等の波形分析を行った。また、有村らは高速1bit信号の量子化雑音の解析に一般化調和解析を導入しその有用性を示した。

本報では、高速1bit符号化、および正確な周波数解析が可能であるという一般化調和解析の利点に着目したマスキングや臨界帯域等の聴覚特性を考慮した高能率符号化による音響信号の高忠実度記録・再生について報告する。

2. 高速1bit符号化

高速1bit処理は何らかの方法で量子化雑音のスペクトルを制御して所望の特性を実現するものである。図-1に各種のAD/DA変換方式を、図-2に各種変換方式と周波数スペクトルを示す。高速1bit符号化の基本構成は図-3のようになっており、帰還ループの中に量子化器を設け伝達関数を適当に操作することにより量子化雑音のスペクトルを制御することができる^{4),5),6)}。2次以下の $\Sigma\Delta$ 変調は安定に動作するが、3次以上の構成では量子化ステップ数の制約や現実の量子化雑音が量子化器の入力と相関をもつこと等により動作が不安定となることがある。量子化雑音の伝達関数は係数含む部分帰還と全体の帰還系で決定される。したがって、高次の系において係数を適当に選ぶことにより量子化雑音のスペクトルの制御が可能である。

2.1 積分出力の加重加算

図-3に示すように積分器を従属接続しそれぞれに重み付けをして加算し1bit量子化器に入力する加重加算接続方式で重みを適当に選ぶと系は安定に動作する。量子化雑音 N_q が入力 X と無相関であるとき、出力を Y 、積分器の次数を n すると伝達関数は

$$Y = H(X) \cdot X + H(N_q) \cdot N_q$$

$$H(X) = \frac{\sum_{n=1}^n a_p \cdot (1-z^{-1})^{n-p}}{(1-z^{-1}) + z^{-1} \cdot \sum_{n=p}^n a_p \cdot (1-z^{-1})^{n-p}} \quad (1)$$

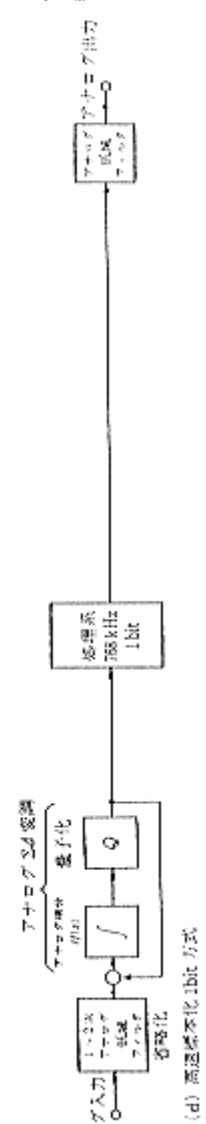
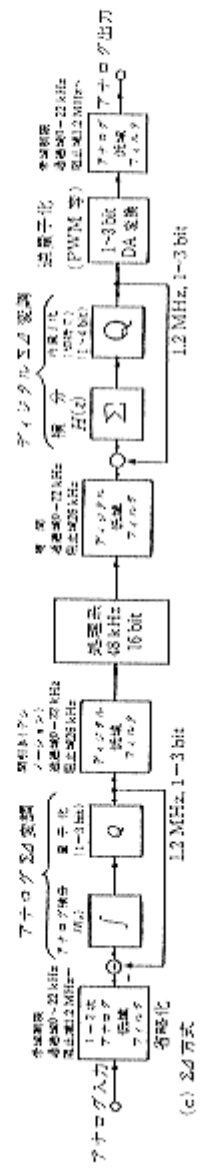
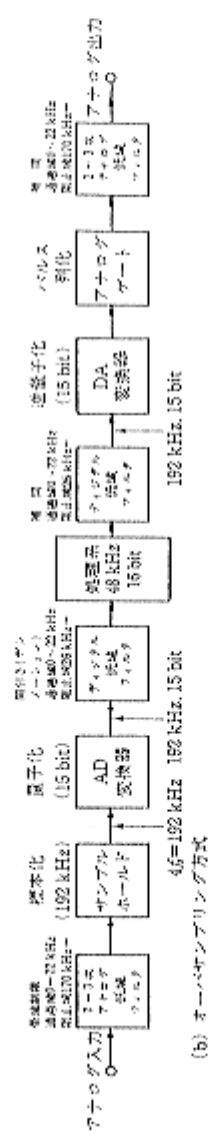
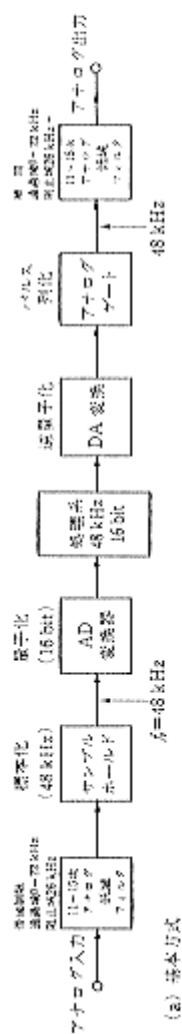
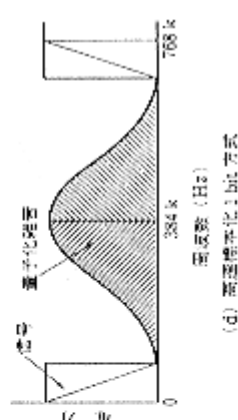
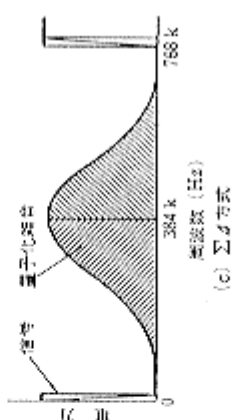
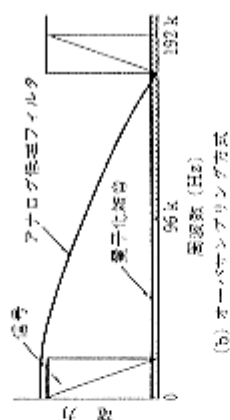
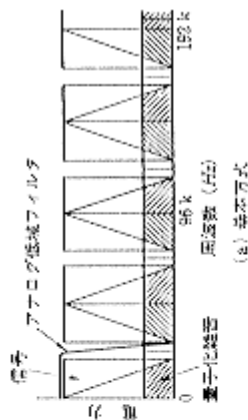
$$H(N_p) = \frac{(1-z^{-1})^n}{(1-z^{-1}) + z^{-1} \cdot \sum_{n=p}^n a_p \cdot (1-z^{-1})^{n-p}}$$

と表わせる。ここで $a_n/a_{n-1} < 1/2$ の場合、系は安定に動作する。

2.2 フィードバック・フォワード1bit符号化

図-4に示すように積分器の間にフィードバックループとフィードフォワード系を設けることで極と零点の制御が可能である。図-5に示す三つの部分帰還系をもつ7次構成の信号の伝達関数 $H(x)$ 、量子化雑音の伝達関数 $H(N_q)$ をシミュレーションにより求めた結果を図-6に示す。また、これをもとに試作した7次1bitAD変換器の測定結果を図-7に示す。

我々は、768kHz標準化1bit量子化の録音器を試作し、録音や測定等に使用している。図-8にその周波数特性を示す。この1bit方式は通常のDAと同じ伝送速度、768kbit/sで超音波領域まで扱うことができるうえ、10kHzの方形波の伝送も可能である。



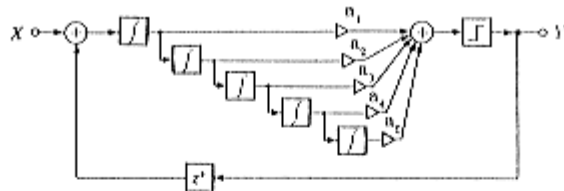


図 - 3 高速1bit符号化の基本構成

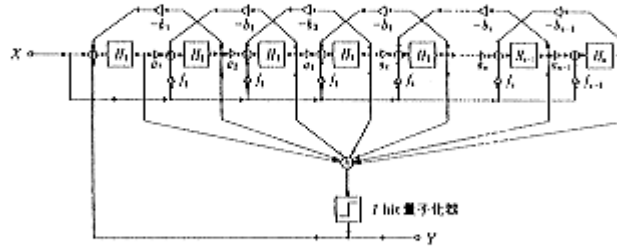


図 - 4 フィードバック・フォワード高速1bit量子化器の構成

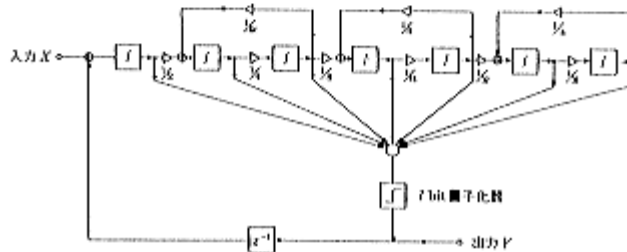


図 - 5 7次部分帰還高速1bit量子化器の構成

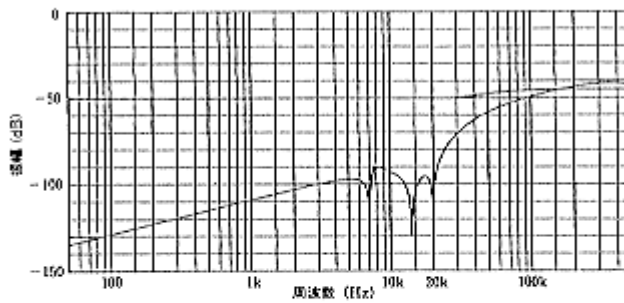


図 - 6 7次量子化器の $H(x)$ と $H(N_q)$

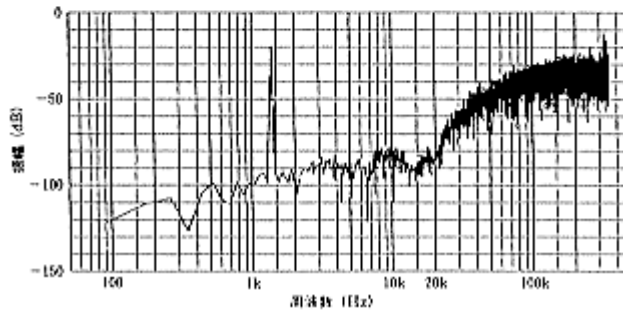


図 - 7 7次高速1bitAD変換器の出力スペクトル

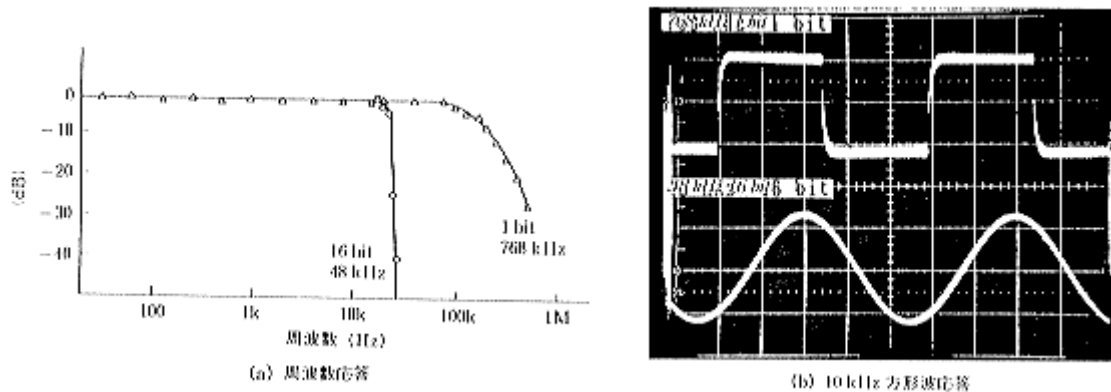


図 - 8 DATの伝送特性

3. 一般化調和解析による量子化雑音の解析

一般化調和解析は1958年にウィナーにより提案された周波数解析手法の一つである⁷⁾。最近では、東山、平田らがこの手法をピアノの音や人の歌声などの非定常信号の解析に導入した⁸⁾。有村らは高速1bit信号の量子化雑音の解析に一般化調和解析を導入しその有用性を示した⁹⁾。

周波数解析には、FFTが広く用いられているが、信号が観測区間外では観測波形が周期的に繰り返されることを仮定しているため、窓の影響を受け非周期的信号の解析には適していない。一方、一般化調和解析は窓の影響を受けることなく非周期的信号の解析を行うことが可能である。一般化調和解析はいわば信号処理の原点に立ち戻った解析手法であり、観測区間内で原波形から残差が最小となる純音を逐次抽出し、残差成分に対して同様の処理を行うことにより解析を行う。したがって、FFTとは異なり窓の影響を受けずに任意の周波数成分について解析を行うことが可能である等の特徴がある。具体的には、以下のように処理は行われる。まずはじめに、原信号から一つの純音を抜くことにより残差成分

$$\varepsilon(t, f) = x_0 - S(f) \sin(2\pi ft) - C(f) \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

を求める。ここで、

$$S(f) = \frac{2}{nT} \int_0^{nT} x_0(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (3)$$

$$C(f) = \frac{2}{nT} \int_0^{nT} x_0(t) \cos(2\pi ft) dt \quad (4)$$

であり、 $x_0(t)$ は区間 $(0, L)$ で与えられた原信号である。

次に、残差成分のエネルギー

$$E(f) = \int_0^L \varepsilon(t, f)^2 dt \quad (5)$$

を得る。

すべての正弦波に対して同様の操作を繰り返し、残差成分のエネルギー $E(f)$ が最小となる正弦波を見つけ出し、一つ目の周波数成分とする。原信号 $x_0(t)$ の代わりに残差信号

$$x_1(t) = x_0(t) - S_1(f_1) \sin(2\pi f_1 t) - C_1(f_1) \cos(2\pi f_1 t) \quad (6)$$

を用いることにより、二つ目の周波数成分を見つけていく。以上の操作を繰り返すことにより、逐次純音を抜き出していく。

N成分抜き出した時、

$$x_0(t) \approx \sum_{k=1}^N \{S_k(f_k) \sin(2\pi f_k t) + C_k(f_k) \cos(2\pi f_k t)\} \quad (7)$$

となる。ただし、 $0 \leq t \leq L$ である。

パワースペクトルは

$$P(f_k) = S_k^2(f_k) + C_k^2(f_k) \quad (8)$$

となる。

図 - 5 に示した 1bit 量子化 7 次 $\Sigma\Delta$ 変調回路で符号化した高速 1bit 信号を FFT により解析した結果を図 - 9 に、一般化調和解析により解析した結果を図 - 10 に示す。いずれの場合も量子化雑音が高域に押し上げられているのがわかる。また、FFT による解析では、周波数成分は等間隔にしか出てこないが、一般化調和解析による解析では任意の周波数について解析を行うことが可能であるため、そのようなことはない。したがって、量子化雑音の分布が必ずしも一様でない様子が確かめられる。

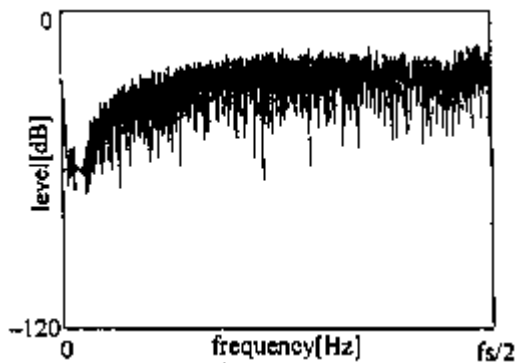


図 - 9 1bit 信号のスペクトル (FFT)

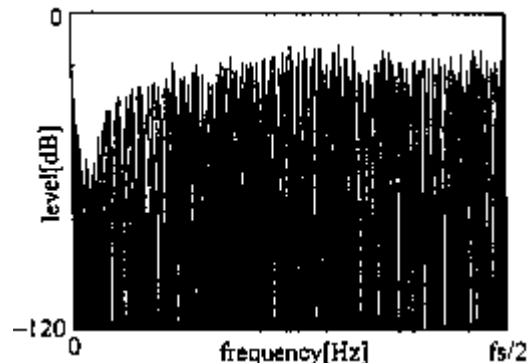


図 - 10 1bit 信号のスペクトル (一般化調和解析)

4. 高能率符号化

高能率符号化において最近注目されている技術は、人間の聴覚特性を利用することにより歪みをできるだけ感知されないように工夫し圧縮する方法である。人間の聴覚には、ある音の存在により最小可聴値のレベルが上昇するマスキング効果や臨界帯域がある。図 - 12 にマスキング効果のモデルを示す。マスキング効果により聞こえなくなった成分を取り除き、聴感上必要十分な成分のみを符号化することにより伝送容量を節約することが可能である。

また、一般化調和解析で細かく特定された周波数成分を伝送するので、語長が長くならざるをえない。一方、人間の周波数弁別には限界があり、必ずしも一般化調和解析で得られた周波数を伝送する必要はない。そこで、人間にはわからない範囲である決められた周波数にまらめることにより、伝送容量の削減が期待できる。

符号化の手続きとしては、まず一般化調和解析により主成分を抽出する。その結果に聴覚特性を考慮することにより、聴感上必要十分な成分を選び、さらに人間の周波数弁別閾を考慮し周波数のまらめを行う。高速 1bit 信号は高域に量子化雑音が集まっているので、一般化調和解析ではほとんど量子化雑音成分が抽出されてしまう。そこで、一般化調和解析で解析する際は人間の聴覚が有効な帯域を中心に信号を解析する。

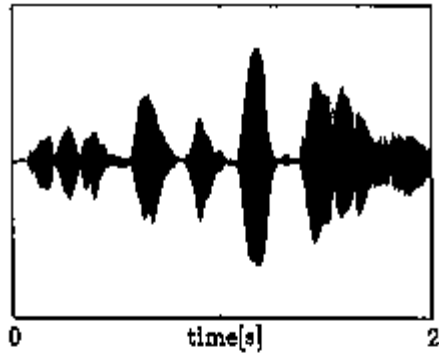


図 - 11 原音

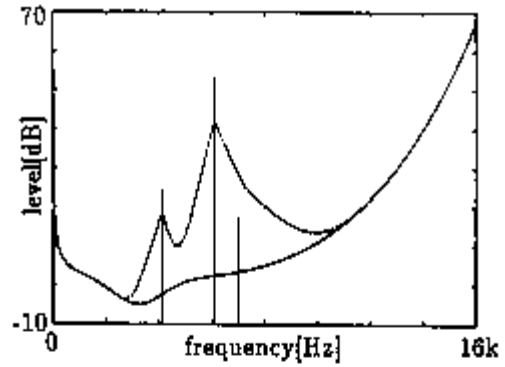
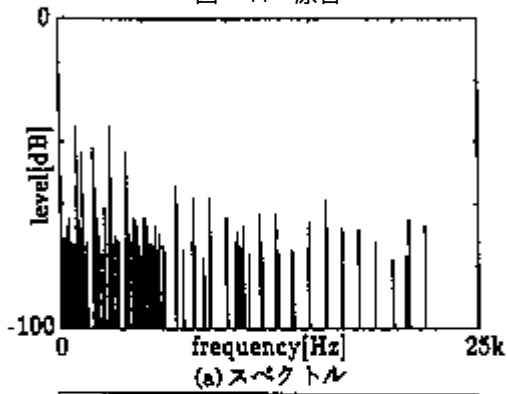
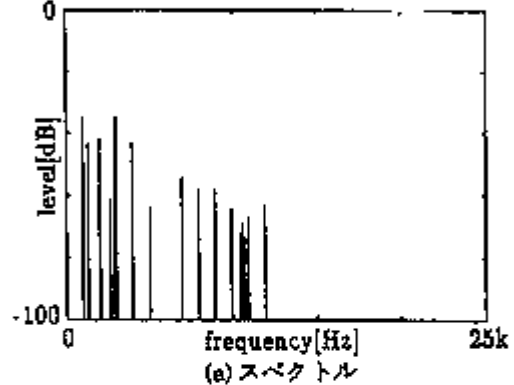


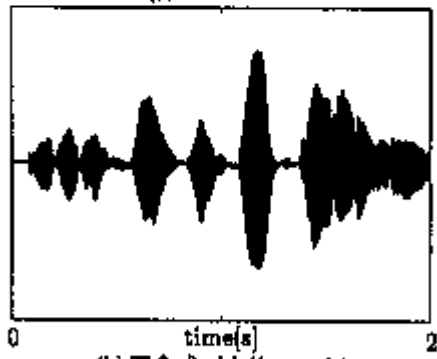
図 - 12 マスキング効果



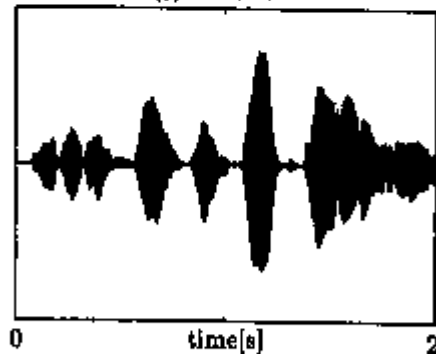
(a) スペクトル



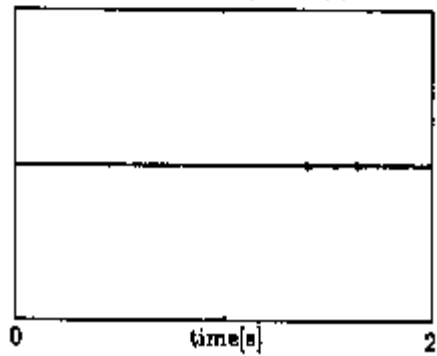
(a) スペクトル



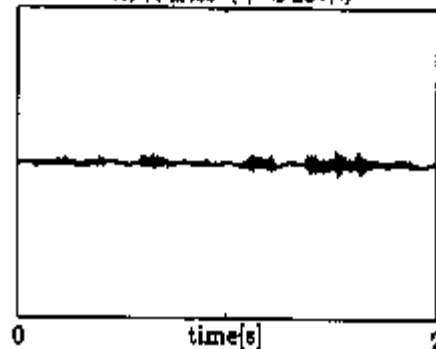
(b) 再合成 (上位 100 本)



(b) 再合成 (平均 23 本)



(c) 残差



(c) 残差

図 - 13 一般化調和解析による結果

図 - 14 聴覚特性を考慮した結果

5. 処理例

原音には無響室で録音したバイオリン演奏信号を用いた。バイオリン演奏信号を約10sごとに切り出し一般化調和解析を行った。図 - 11に原波形を示す。図 - 13に一般化調和解析により各区間について100成分抽出し再合成した波形,残差波形,解析結果を示す。伝送容量は約250kbit/sである。また,図 - 14に聴覚特性(マスキング効果,周波数弁別)を考慮し聴感上必要十分な成分を抽出し高能率符号化を行った結果から再合成した波形,その際の残差成分,解析結果を示す。

聴覚特性を考慮することにより,選ばれる成分数は区間により異なるが平均23成分となった。この時の伝送容量は約60kbit/sである。

周波数のまるめについては,1セント~10セントの範囲で試みたところ,3セント程度の間隔で決められた周波数にまるめた場合まで違和感のない伝送が可能であった。

6. むすび

以上高速1bit符号化による音響信号の高忠実度記録・再生について述べた。特に一般化調和解析を用いた量子化雑音の解析,高能率符号化について報告した。人間の聴覚特性を考慮することにより,100kbit/s以下の伝送容量で聴感上十分な符号化が可能であることが確認された。

一方,1bit量子化の出力電力は一定である。すなわち,マルチビットとは異なり信号と量子化雑音の総電力が一定で量子化雑音電力は信号のレベルに依存する。通常のマルチビット符号化とここで述べた高速1bit符号化を統一的に説明し得る理論体系の確立が望まれる。今後,一般化調和解析がこの問題を説明する糸口となるであろう。

文献

- 1) 山崎芳男,“広帯域音響信号の量子化への大振幅ディザの適用,”音響学会誌,vol.39, pp. 452 - 462,(1983).
- 2) 西川明成,太田弘毅,山崎芳男,名越英之,野間政利,“高速1bit信号処理における伝達特性の制御,”音講論集, pp.623 - 624,(1994.10 - 11).
- 3) 山崎芳男,太田弘毅,西川明成,野間政利,飯塚秀幸,“広帯域音響信号の高速標準化1bit処理,”信学技法,EA93 - 103, pp.31 - 38,(1994.3).
- 4) 山崎芳男,唐川周三,遠藤一夫,野間政利,太田弘毅,“高速1bit符号化における目的に応じた量子化雑音の制御,”音講論集, pp.593 - 594,(1995.9).
- 5) 山崎芳男,太田弘毅,野間政利,名越英之,“高速1bit処理による量子化雑音の適応スペクトル制御,”音講論集, pp.521 - 522,(1993.10).
- 6) 飯塚秀幸,名越英之,山崎芳男,西川明成,“高速1bit符号化の量子化雑音のスペクトル分布とその制御,”音講論集, pp.533 - 534,(1994.3).
- 7) N.Wiener,“The Fourier Integral and Certain of Its Application”,Dover Publication Inc,(1958).
- 8) T.Terada, H.Nakajima, M.Tohyama and Y.Hirata,“Nonstationary Waveform Analysis and Synthesis Using Generalized Harmonic Analysis”,IEEE - SP, pp.429 - 432,(1994).
- 9) 有村剛志,山崎芳男,太田弘毅,名越英之,野間政利,“高速1bit符号化における量子化雑音の解析手法の検討,”音講論集, pp.583 - 584.(1995.3).