

周波数ホッピング方式によるデジタル音楽への電子透かし法の提案

岩切 宗利 松井 甲子雄

防衛大学校 情報工学科

〒 239-8686 横須賀市 走水 1-10-20

あらし この報告では、スペクトル拡散の一方式である周波数ホッピングを用いて、高品質なデジタル音楽ソフトに電子透かしを埋め込む手法を提案する。その原理は、音楽データを変形離散コサイン変換で周波数係数値へ変換し、その特定成分に透かしを埋め込むものである。すなわち、ランダムな系列として準備した鍵データによるホッピングパターンによって各音声フレームごとに異なる周波数帯域へ埋込みを施す。この鍵データを所有しない者には、その埋込みパターンを特定することが困難である。本方式によれば、透かし成分の一部は帯域通過フィルタの影響を受けず、残存できる利点がある。さらに、周波数係数値への埋込みをその隣接成分で適応化することにより、波形スペクトルのレベル変調にも強い透かしを実現した。本手法を用いた実験では、40dB以上の高音質を維持しつつ、MPEGなどの高効率圧縮を施しても透かしが消失しないことを確かめている。

キーワード 電子透かし, デジタル音楽, スペクトル拡散, 周波数ホッピング, MDCT

Watermarking Technique for Audio Data by Frequency Hopping Method.

Munetoshi IWAKIRI Kineo MATSUI

Department of Computer Science, National Defense Academy

1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka 239-8686

Abstract This paper presents a digital watermark scheme for high quality audio data. It is constituted with frequency hopping by random key sequence and embedding of watermark by the modified discrete cosine transform. The watermark signal is uniformly spread over the whole window frame when it is embedded to sound, and the watermarked noise is suppressed in very low level. Therefore, the sound quality is attained more than 40dB in the segmental SN ratio by our scheme. The frequency hopping scheme brings us a robust watermark for copyright protection, thus the watermark is proof against such attacks as bandpass filtering, amplification and lossy compression.

key words Watermark, Digital Audio, Spread Spectrum, Frequency Hopping, MDCT

1. はじめに

音響データは、通常、サンプリング定理に基づいて音声
を標準化し、量子化して線形パルス符号化 (PCM: Pulse
Code Modulation) [1] によりデジタル化されている。特
に、音楽ソフトは、サンプリングレート 44.1kHz, 16bit
量子化の PCM によりデジタル化される。この方法によ
ると、人間の可聴周波数帯域を全てカバーできるため、
聴感的に高い音質を保ったままデジタル化できる。

一方、このデジタルデータは完全な形式で容易に複製
できる特徴がある。この忠実な再現性はデジタル化の大
きな利点である反面、デジタル著作物の著作権保護が必
須の要件になる。この対策として、著作権情報を人間が
知覚できない形式で音楽ソフトに埋め込む電子透かし [2]
が注目されている。

音楽コンテンツへの電子透かしやそれに類する試みと
して、Boney らによる聴感的マスキングを利用する手法
[3]、松井らの量子化雑音に見せかける手法 [4]、岩切らの
圧縮音声符号に直接埋め込む手法 [5, 6, 7] やスペクトル
拡散法 [8]、富岡らの音源定位制御法 [9] および松本らの
シンセサイザ符号 (SMF) への埋込み法 [10] などが検討
されている。これらの手法によれば、聴感的な音質をほ
んど劣化することなく透かし信号を埋め込むことがで
きる。また、スペクトル拡散 [11] を応用した電子透かし
技術は、拡散符号列を鍵とすることで高い秘匿性を実現
できる手法と考えられる。しかし、従来、電子透かしと
して検討されたスペクトル拡散は、直接拡散 (DS) 方式
[11] を原理 [8] としたものである。本研究では、スペクトル
拡散のもう一つの手法である周波数ホッピング (FH)
方式 [11] に基づいた音楽ソフトへの電子透かし法につ
いて検討した。

その方法は、各コンテンツごと異なる疑似乱数系列に
よる周波数ホッピングパターン [11] (FH パターン) を
鍵データとして準備し、電子透かしの存在を秘匿するた
めに埋込みを施す周波数成分を時間軸上でランダムに変
化させるものである。この単位時間当りの埋込み成分の
変化の頻度を高くすれば、狭帯域の透かし信号が時間軸
上でランダムに広帯域へ拡散された状態になり、そのパ
ターンを知らない第三者による埋込み信号の不正な抽出
を困難にできる。また、音楽データの占有帯域に対して
透かしの埋込み帯域幅が狭く、その埋込み位置の分布が
ランダムで一樣なほど、デジタル信号処理による影響を
受けにくいと考えられる。

2. では FH (Frequency Hopping) 方式のスペクトル
拡散および変形離散コサイン変換を用いた透かしの埋込
み方法を示す。3. では FH 方式を原理とする埋込みの特
徴について示す。4. では、この原理に基づいたシステム
を構成し、2, 3 の実験を行った結果を示す。

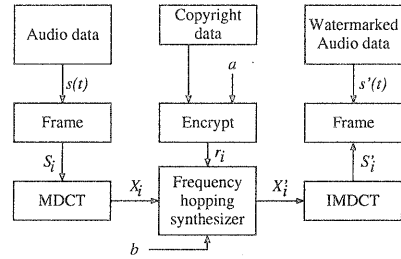


図 1: 透かしの埋込み処理の流れ

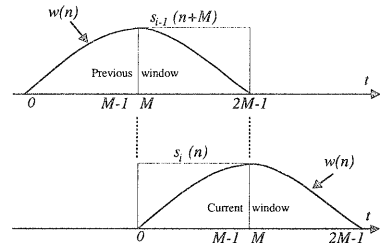


図 2: MDCT の窓関数

2. 透かしの埋込みと復号

2.1 埋込み法

本手法を用いた電子透かしの処理ブロックを図 1 に示
す。まず、音楽ソフトから抽出された音声信号を変形離
散コサイン変換 (MDCT) する。MDCT [12] は、図 2 に
示すように M 個のスペクトル係数を求めるために $2M$
個の時系列サンプルを用いる。これは周波数分離度を高
くし、かつ、フレームを互いに重複させてフレーム間歪
みを抑制する処置である。

サンプリング時刻 t における音声信号を $s(t)$ としたと
き、 i 番目の音声フレーム S_i の MDCT 係数 $X_i(k)$ は

$$X_i(k) = \frac{2}{M} \sum_{n=0}^{2M-1} w(n) \cdot c(k, n) \cdot s(n + iM) \quad (1)$$

$$0 \leq k \leq M-1, 0 \leq n \leq 2M-1$$

により求まる。窓関数 $w(n)$ および MDCT 基底 $c(k, n)$
は、それぞれ

$$w(n) = \sin\left(\frac{\pi(2n+1)}{4M}\right), \quad 0 \leq n \leq 2M-1 \quad (2)$$

$$c(k, n) = \cos\left(\frac{\pi(2k+1)(2n+M+1)}{4M}\right) \quad (3)$$

$$0 \leq k \leq M-1, 0 \leq n \leq 2M-1$$

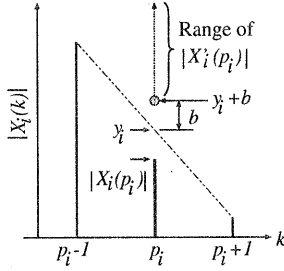


図 3: 埋込み規則

である。ここで、電子透かしの秘匿性を確実にするためにスペクトル拡散法の一方式である周波数ホッピング [11] を用いる。まず、鍵 a を用いて暗号化した著作権データからビット列 r_i を各 MDCT フレームごとに抽出し、

$$p_i = r_i \pmod{M-2} + 1 \quad (4)$$

のように FH パターン [11] $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots\}$ を定める。これは、埋込み処理を隣接する成分の強さの平均値

$$y_i = \frac{|X_i(p_i-1)| + |X_i(p_i+1)|}{2}, \quad 1 \leq p_i \leq M-2 \quad (5)$$

で適応化するための準備である。ここで、図 3 のように透かしの強度を制御する値 b を導入し

$$|X_i'(p_i)| = \begin{cases} |X_i(p_i)|, & \text{if } |X_i(p_i)| > y_i + b \\ y_i + b, & \text{if } |X_i(p_i)| \leq y_i + b \end{cases} \quad (6)$$

とする。この $|X_i'(p_i)|$ を埋込み処理済の信号成分とする。さらに、オリジナルの $X_i(p_i)$ と同じ正負符号の $X_i'(p_i)$ を置き換えることで MDCT 係数上での埋込み処理を完了する。この MDCT 係数 $X_i'(k)$ を逆変換すれば、透かしが埋め込まれた状態の音声フレーム S_i' を生成できる。同様の埋込み処理を繰り返し、各フレームごと異なる周波数成分へ埋込みを施したうえで図 2 のように隣接するフレームを干渉させながら署名済みの音楽データを再生する。この方法によれば、音声全体の波形スペクトルに不正なレベル変調を受けても、各成分の相対的な大小関係が保たれるため不正処理に対して高い耐性を実現できる。また、本方式では各変換フレームごと異なる周波数成分を制御するためフレーム間歪みを生ずるが、MDCT 変換法により隣接フレームを互いに干渉させることで、この歪みを低減できる長所もある。さらに、本手法によれば周波数ホッピングパターンに用いたランダム系列 r_i を鍵データとして透かしの存在を秘匿できる。

2.2 透かしの復号

透かしの検出は、次の手順で行う。まず、音楽データから抽出した $2M$ サンプルの標本値 S_i' を MDCT 係数

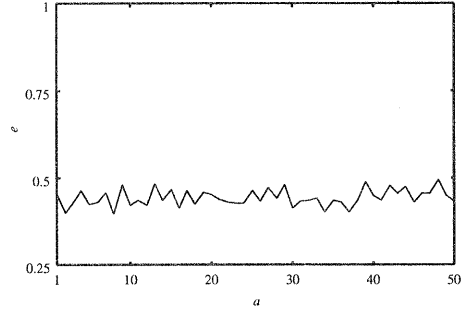


図 4: ランダムな FH パターンによる検出例

$X_i'(k)$ へ変換する。つぎに、埋込みに用いた FH パターンによって定まる周波数成分の強さ $|X_i'(p_i)|$ と隣接成分 $X_i'(p_i-1), X_i'(p_i+1)$ から式 (5) にしたがってそれらの平均値 y_i を求め、その大小関係を調べる。その結果、 y_i が対象とする $|X_i'(p_i)|$ に対して大きいか否かにより、次式で透かし出力 d_i を決定する。

$$d_i = \begin{cases} 1, & |X_i'(p_i)| \geq y_i \\ 0, & |X_i'(p_i)| < y_i \end{cases} \quad (7)$$

この操作を全ての音声フレーム S_i について実行し、 $d_i = 1$ の分布を調べる。

まず、全音楽データから得られる音声フレーム S_i のフレーム数を I とする。このとき、透かし出力 $d_i = 1$ の検出率 e は、

$$e = \frac{\sum_{i=1}^I d_i}{I} \quad (8)$$

として算出できる。ここで埋込みを施した周波数成分 $X_i'(p_i)$ を全て特定できたならば、常に $|X_i'(p_i)| \geq y_i$ の関係が成立する。すなわち、正しい FH パターン P を知る者のみが、透かしの出現率 $e = 1.0$ を得られるのである。一方、FH パターンを知らない者がランダムに選んだ周波数成分から透かし出力を得ようとしても $|X_i'(p_i)|$ と y_i の大小関係が不定になるため、図 4 のように約 0.5 以下の検出率になる。また、この図から隣接する周波数成分の大小関係は、一般にランダムであることもわかる。したがって、埋込みに用いた FH パターン P を知る者でなければ、正しい透かし出力を得ることは難しい。本方式では、透かしを検出するための FH パターン P の生成に暗号化のアルゴリズムと鍵および著作権データが必要であることに注意する。

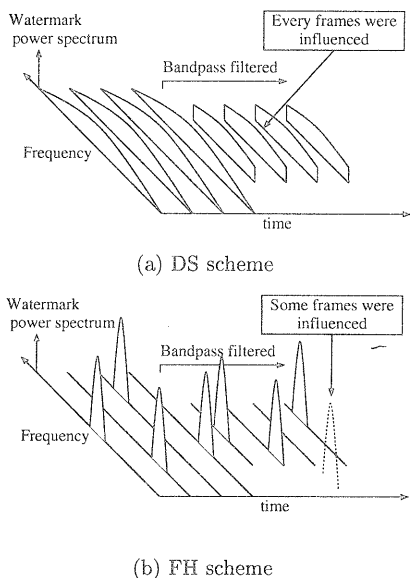


図 5: 帯域通過フィルタの影響

3. FH方式の特徴

3.1 透かしの秘匿性

スペクトル拡散を原理とする電子透かしとして、すでに岩切らによる直接拡散 (DS) 方式を用いた手法 [8] が提案されている。その方法によれば、各音声フレームごとに狭帯域な透かしの周波数スペクトルを帯域全体へ平坦な状態に拡散するため、埋込みに用いた乱数系列がなければ透かしのスペクトルを元の状態に集中できない。すなわち、DS 方式では、この乱数系列が透かし情報を復号するための鍵となっている。たとえば、その系列長が M ビットならば、 2^M 個の鍵が存在することになる。

一方、ここで提案する周波数ホッピング (FH) 方式は、埋込み周波数成分を高い頻度でランダムに変化させ、時間軸上で周波数スペクトルの分布を平坦にするものである。よって、埋込みを施した周波数成分を正しく特定できなければ、高い検出率 e を得られない。すなわち、FH 方式では時間軸上の埋込み周波数成分の変化 (FH パターン) が透かしの復号する鍵となる。たとえば、ある音声フレームから M 個の周波数係数が生成された場合、埋込み成分の選択肢は $M-2$ 通り存在することになる。このとき、 I 個の音声フレームから構成される音楽データへ透かしの埋め込み、復号するための鍵の種類数は $(M-2)^I$ である。たとえば、 $M=1024$ 、 $I=50$ とするとき鍵の総数は約 10^{150} となるので、埋込みに用いた FH パターンを知らない第三者にとって、透かしが埋め込まれた周波数成分を特定することは困難であると思われる。

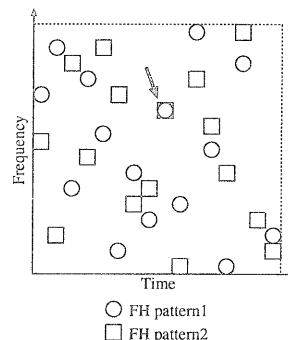


図 6: 透かしの多重化と独立性

したがって、これらのスペクトル拡散を原理とする埋込み手法は、高い秘匿性が要求される電子透かしに適していると考えられる。

3.2 帯域通過フィルタ耐性

DS 方式による電子透かしは、図 5(a) のように帯域全体に透かし信号のスペクトルが存在するため、帯域通過フィルタによって攻撃を受けるといずれの音声フレームも影響を受ける。一方、FH 方式では、この攻撃によって同図 (b) のように影響を受ける音声区間が限定される。一般に、音質を高く維持する通過帯域幅は制限帯域に比べて広く設定されるため、FH 方式を原理とした埋込み方法では、大部分の透かし成分が帯域フィルタによる影響を受けずにすむ利点がある。また、音質の劣化と引き換えに通過帯域幅を狭く設定して攻撃されても、周波数成分に閾値を適用して制限帯域を判別し、不適切な透かし出力を棄却すれば透かしの判定に問題を生じない。これらの特性から、FH 方式による電子透かしは、帯域通過フィルタに良好な耐性を実現できる手法であるとみなせる。

3.3 多重埋込み

FH 方式による電子透かしは、埋込みに用いる FH パターンが異なる複数の透かしの多重化できる。たとえば、図 6 のように、二つの異なる FH パターンの埋込みを多重に施しても互いに影響を与えることはない。このように互いに異なる周波数成分へ透かしの埋め込む FH パターンを用いれば、同一のコンテンツに複数の透かしの多重に埋め込むことができる。また、図 6 の矢印成分のように埋込みの一部が偶然に重複することも考えられる。たとえば、ある音声フレームに埋込み成分の選択肢が $M-2$ 個存在した場合、多重化した透かしの埋込み位置が重複

Name	Samples	Sec
Classic	440,832	10
Jazz	440,832	10
Dance	440,832	10

する確率は $1/(M-2)$ である。さらに、2 箇所の音声フレームで埋込み成分が重複する確率は $1/(M-2)^2$ である。同様に、複数の音声フレームで埋込み成分の重複が生起する確率は一般に低いと考えられる。したがって、本方式によれば、複数の透かしを同一のコンテンツへ多重に埋め込んでも問題ないと考えられる。ただし、FH パターンの生成アルゴリズムを設計する際に、透かしの埋込み位置が重複しない系列を発生させる手法を適用する着意は必要である。

4. 実験結果と考察

高音質な音楽ソフトに電子透かしを埋め込む際、音質の劣化が少なく音楽データを高能率圧縮しても透かしが消失しにくいことが望ましい。本実験では、高音質な音楽データに埋込みを施したとき、音質に与える影響および MPEG Audio LayerIII(MP3)[13] による高能率圧縮などのデジタル信号処理が透かしに与える影響について検討した。

4.1 実験音声

表 1 の実験データは、音楽ソフトの再生音を 44.1kHz/16bit でデジタル化したものである。通常、これらの音楽ソフトはステレオ音であるが、議論を簡単にするため、その片側成分のみを抽出して実験データとした。また、実験に用いる FH パターンの生成には、あらかじめ 255 種類の疑似乱数データ (No.1~255) を準備した。

4.2 音質の評価法

音質の客観的な評価尺度として最も基本的なものに信号対量子化雑音比 (SNR : Signal to quantization Noise Ratio) がある。SNR[dB] の評価式は、入力音声 $S_o(m)$ とその量子化誤差 $Er(m)$ を用いて次のように定義される [1]。

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_m S_o^2(m)}{\sum_m Er^2(m)} \right\} \quad (9)$$

ここでは、SNR を改良して主観評価との対応関係を向

上した SNR_{seg} (Segmental SNR) を用いた [1]。

$$\text{SNR}_{\text{seg}} = \frac{1}{N_f} \sum_{f=1}^{N_f} \text{SNR}_f \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

N_f は測定区間のフレーム数を表し、 SNR_f は、 f フレームにおける SNR である。本実験では、1 フレームの長さを 32ms とした。また、誤差のない音声フレームすなわち、 $\text{SNR}_f = \infty$ の音声フレームを除外して測定した。

4.3 音質への影響

表 1 に示した実験音声へ透かしを埋め込んだときの音質を調べた。ここでは、拡散帯域幅を決定する MDCT 変換のフレーム長 M と埋込み強度のパラメータ b を変化させた結果をそれぞれ図 7 および図 8 に示す。これらから、ある程度の大きさの M までは、埋込み周波数の広帯域化によって埋込み頻度が減少し音質が向上した。また、透かし強度 b が弱いほど音質に与える影響を少なくすることもわかる。これは埋込みの際に条件を満たさない周波数成分への制御量が少なくなること起因する。

さらに、本方式では音声フレームごとに異なる周波数成分を操作するため、フレーム間に予測できない歪を生じやすい。図 9 にオリジナルの波形と透かしを埋め込んだ波形を比較し、透かし信号の埋込みによる音声波形への影響を観察した。図 9(a) に Classic のバイオリン演奏音の一部 (8,000 サンプル) を抽出した波形、図 9(b) に $M = 1024, a = 1, b = 10$ による埋込みを施した波形、図 9(c) にそれらの差分波形を示した。これらの波形から音声フレーム間に不自然な波形歪が生じないことを確認できた。これは埋込みのための周波数変換法に、MDCT を用いて隣接するフレーム同士を干渉させたためであると考える。また、著者らの聴取によれば、埋込みを施した再生音声とオリジナルの音質に差異を感じられなかった。

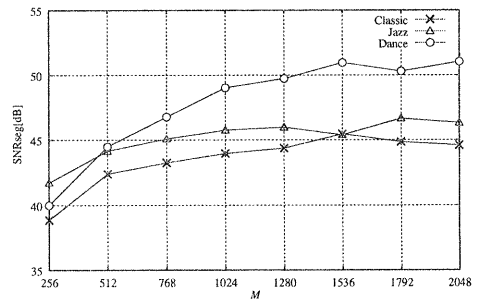


図 7: M に対する $\text{SNR}_{\text{seg}} (a = 1, b = 10)$

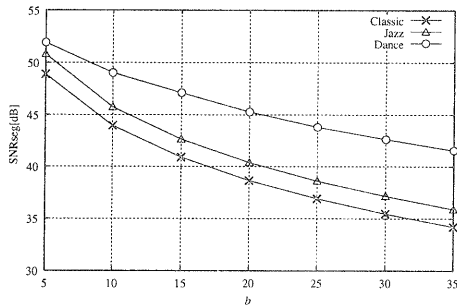


図 8: b に対する $\text{SNR}_{\text{seg}}(M = 1024, a = 1)$

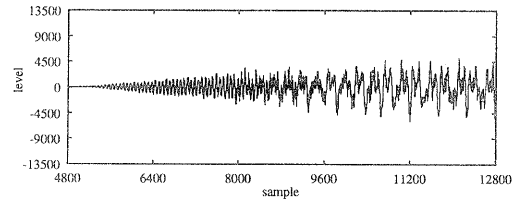
4.4 透かしの多重化と検出

本手法によれば、透かし信号の埋込みに用いた周波数ホッピングのパターンを鍵とすることで高い秘匿性を実現できる。ここでは、複数の検出鍵 (FH パターン) をランダムに準備し、それらの擬似鍵で不正に透かしが検出されないかどうかを確認した。まず、Classic に 2 種類の埋込み鍵 $a = 64, 128$ で $b = 10, M = 1024$ による透かしの埋込み、それら以外のランダムな 253 種類の擬似鍵 a による検出結果を図 10 に示す。この図は、横軸に検出鍵の種類を表し、縦軸にその鍵による透かしの検出値を示している。実験の結果 (図 10 参照) から、擬似鍵による検出率は約 0.4 程度でほぼランダムになることがわかった。これは、検出に用いた周波数成分 $X'_i(p_i)$ とその隣接成分の平均値 y_i の大小関係がほぼランダムであることを示している。一方、正しい埋込み鍵で透かしを検出すると埋込み周波数成分 $X'_i(p_i)$ がその隣接成分の平均値 y_i より常に大きく (検出値 “1”) なる。よって、本方式によれば検査対象のコンテンツと透かしの埋込みに用いた FH パターン (検出鍵) が一致しなければ高い検出率を得られないことがわかる。したがって、鍵情報を保有しない第三者が透かしの存在を不正な手段で特定し、音質をほとんど劣化することなく透かし情報のみを除去することは難しい。

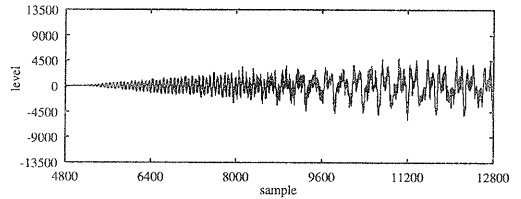
また、この実験結果 (図 10 参照) から異なる FH パターンを用いた複数の透かしの同一のコンテンツへ多重に埋込み、検出できることもわかった。

4.5 レベル変調耐性

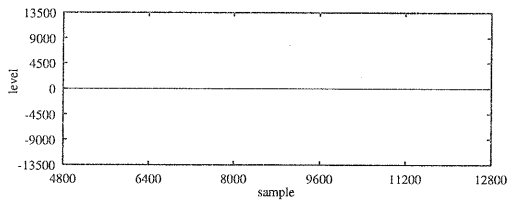
透かしの埋込みを隣接する周波数成分で適応化する手法は、音声のダイナミックレンジを変化させる増幅や減衰などの処理に耐性を持つと考えられる。そこで、 $a = 1, b = 10, M = 1024$ の条件で埋込みを施した Classic の波形スペクトルを定数 0.5 ~ 1.5 で増幅 (減衰) し透かし



(a) Decoded waveform of piano sound without watermark



(b) Decoded waveform of piano sound with watermark



(c) Difference waveform

図 9: 音声波形の比較

が消失しないかどうかを調べた。その結果得られた表 2 の検出率から、本方式によれば音声波形の波形振幅レベルの変調による影響を受けにくいことを確認できた。

4.6 帯域通過フィルタ耐性

周波数ホッピング方式を用いて透かしの埋込みの利点として、帯域通過フィルタへの耐性がある。DS 方式では、広い周波数帯域へ透かしがフラットな弱いスペクトルとして拡散するため、全ての音声区間で帯域通過フィルタの影響を受けることになる。その対策として、透かしの強度を高くした上で、高音質を維持するために拡散帯域幅を広くする処置が必要であった。一方、FH 方式

表 2: レベル変調による影響

Amplification rate	0.50	0.75	1.25	1.50
e	1.00	1.00	1.00	1.00

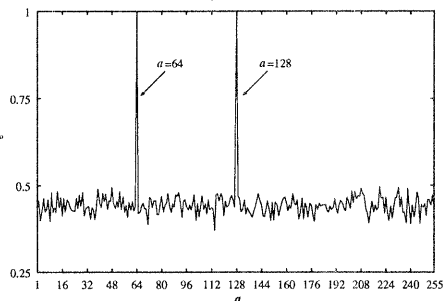


図 10: 多重透かしの検出率 ($b = 10, M = 1024$).

表 3: 帯域通過フィルタによる影響

Band[kHz]	Classic	Jazz	Dance
1 to 21	0.87	0.87	0.87
2 to 20	0.84	0.82	0.83
3 to 19	0.77	0.77	0.75
4 to 18	0.73	0.75	0.74
5 to 17	0.70	0.69	0.70

によれば制限帯域外に埋め込まれた透かし成分は原理的にフィルタリングの影響を受けにくいと考えられる。そこで、一般に利用されている離散フーリエ変換による帯域通過フィルタ [1] を用いて再生音楽の帯域幅を制限し、透かし信号が消失しないかどうかを調べた。表 3 に $a = 1, b = 10, M = 1024$ として埋込みを施し、帯域制限を施した音楽データの周波数帯域と、それらからの透かし検出率を示した。この結果から、FH 方式を原理とする電子透かしは帯域通過フィルタに対して高い耐性を有することがわかった。さらに、帯域通過フィルタ処理を受けた周波数成分を判別できれば、透かしの検出率を向上できると考える。

4.7 高能率圧縮符号化の影響

周波数変換やサブバンド符号化などを原理とした高能率圧縮符号化方式である MPEG Audio Layer III (MP3) のアルゴリズム [13] を用いて高度なデジタル信号処理への耐性を調べた。MP3 による符号圧縮は、インターネットを利用した高音質な音楽の配信ツールとして普及しており、その不正目的の利用について著作権保護上の問題が指摘されている。本実験では、インターネットで標準的に利用されている圧縮率が約 1/10 のビットレートの MP3 を用いた。図 11 は、 $a = 1, b = 10$ として M を変化させながら埋込みを施した実験データを MP3 で圧縮

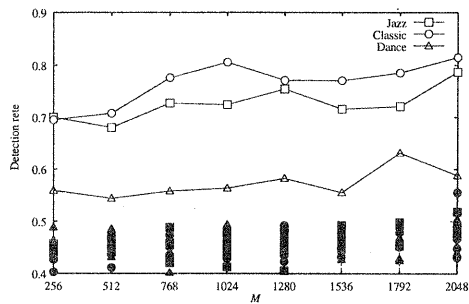


図 11: MPEG 圧縮による影響

伸張し、その再生音楽から透かしを検出した結果である。この図は、埋込み鍵と異なる擬似鍵による検出率を黒色の凡例 (■●▲) で示し、正しい鍵による検出率を白色の凡例 (□○△) で示したものである。この結果から、MP3 圧縮符号化による冗長成分の除去によって透かしの検出率がやや低下するものの、正しい鍵による検出値が一般に高い値を示すことを確認できた。

4.8 Jitter Attack

音楽データに埋め込まれた電子透かしの破壊する攻撃法として知られる Jitter Attack [14] によって、本手法による透かしが消失しないかどうかを調べた。Jitter Attack は、音楽の周波数帯域を不特定に 0.1% 程度増減する攻撃法である。これは、人間の聴覚が微少なピッチの変動を知覚できない特徴を利用したものである。まず、実験データに $a = 1, b = 10$ の鍵で M を変化させながら透かしの埋め込み、Jitter Attack を施した再生音楽データを作成した。これらのデータから透かしを検出した図 12 の結果から、 M を大きな値にするほど各透かしフレームにおよぼす Jitter Attack の影響が強くなり透かしの検出率が低下することがわかった。したがって、Jitter Attack への耐性が必要ならば埋込み処理の MDCT 変換フレーム長 M を小さな値とするのが望ましい。

5. おわりに

この報告では、音楽ソフトに用いられる高品質音声データに透かし情報を密かに埋込む方法を提案した。本手法によれば、音楽ソフトの音質をほとんど損なうことなく、ある程度の符号圧縮やデジタル信号処理にも耐える電子透かしの埋め込みができる。よって、不正コピーされた音楽ソフトを調べて透かし情報を検出することで不正行為の事実を特定できる。

一方、利用者は、透かしの存在を知覚できないように

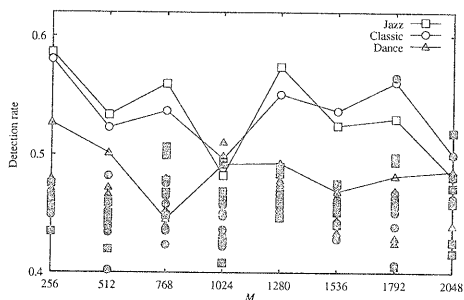


図 12: Jitter attack による影響

不正な手段でその存在を知ることも難しい。よって、不正行為を心理的に抑止する効果も期待できる。

参考文献

- [1] 小澤一範：デジタル移動通信のための高能率音声符号化技術，トリケップス (1992)。
- [2] 松井甲子雄：電子透かしの基礎-マルチメディアのニュープロテクト技術，第7章，森北出版 (1998)。
- [3] Boney, L., Tewfik, A.H., and Hamdy, K.N.: Digital watermarks for audio signals, *Proc. of the International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp. 473-480 (1996)。
- [4] 松井甲子雄，中村康弘，ナタウトサムパイブーン：音声通信への文字情報の埋め込み，第18回情報理論とその応用シンポジウム，pp. 389-392 (1995)。
- [5] 岩切宗利，松井甲子雄：適応差分PCM符号化における音声符号へのテキスト情報の埋め込み，情報処理学会論文誌，Vol.38, No.10, pp. 2053-2061 (1997)。
- [6] 松井甲子雄，岩切宗利：低遅延符号励振線形予測符号化による音声符号への電子透かし，画像電子学会誌，Vol.27, No.5, pp. 475-482 (1998)。
- [7] 岩切宗利，松井甲子雄：共役構造代数符号励振線形予測による音声符号へのテキスト情報の埋め込み，情報処理学会論文誌，Vol.39, No.9, pp. 2623-2630 (1998)。
- [8] 岩切宗利，松井甲子雄：スペクトル拡散と変形離散コサイン変換による高品質デジタル音声のための電子透かし法，情報処理学会論文誌，Vol.39, No.9, pp. 2631-2637 (1998)。
- [9] 富岡淳樹，中村高雄，小川宏，高嶋洋一：マルチチャンネルデジタルオーディオに対する電子透かし，1998年電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会，D-14-4, p.323 (1998)。
- [10] 松本勉，井上大介，北林創太：演奏データファイルSMFへの情報ハイディング方式，2000年暗号と情報セキュリティシンポジウム，SCIS2000-C03(2000)。
- [11] 山内雪路：スペクトラム拡散通信，東京電機大学出版 (1994)。
- [12] 筒井京弥：楽音・音声圧縮方式-ATRAC2，インターフェース，Vol.23, No.7, pp. 134-142, CQ出版 (1997)。
- [13] Rao, K.R., Hwang, J.J.: *Techniques and Standards for Image, Video, and Audio Coding*, Prentice Hall (1996). (安田浩，藤原洋監訳：デジタル放送・インターネットのための情報圧縮技術，共立出版 (1998))。
- [14] Petitcolas, F.A.P., Anderson, R.J. and Kuhn, M.G.: Attacks on Copyright Marking Systems, *Second Workshop on Information Hiding*, pp. 218-238 (1998)。