

## フィードフォワードシラビックコンパングの 高調波歪みの解析と検証

### Analysis and Verifications of the Harmonic Distortions in Feed - Forward Syllabic Companders.

岸 政七†, 岩田 宏†  
Masahichi KISHI, Hiroshi IWATA

*Abstract* The Companders are indispensable to prevent radio resources from exhaustion on the stage of developing high capacity cellular telephone systems. Signals suffered from fading noise over poor radio channel are efficiently improved in speech quality via companding during the feed-forward structure. Harmonic distortions of the feed-forward compander are successfully verified as shown in this report to clear CCITT criteria through both theoretical analysis and computer simulations.

#### あらまし

移動通信に特有なフェーディング雑音を効率よく削減するコンパングは、送信電力を低減しても通話品質を高く保ち、周波数のリユースを容易にする。特にフィードフォワードで構成するとき、コンパングのフェーディング耐力が増強されることは知られている。ここでは、フィードフォワードシラビックコンパングの高調波歪み特性を詳細に検討した結果を報告する。

#### 1. まえがき

従来のコンパングは、送信側で音声を対数の意味において2:1に圧縮し、受信側で1:2に伸長することで、伝送路上で混入するフェーディング雑音等を抑圧し、通話品質を改善する。現在、多く用いられるアナログ処理によるフィードバック(以下FBと略す)シラビックコンパングは、FBループに起因する過渡応答特性の劣化が報告されている[1]。著者らによって既に提案されているフィー

ドフォワード(以下FFと略す)シラビックコンパングは、このFBループを排除し、過渡応答に優れた特性を実現している[2,3]。

本論文ではこのFFコンパングが、高調波歪みを十分抑圧し、CCITT G.162[5]の勧告に準拠することを理論とシミュレーション実験の両面から検証する[4]。

#### 2. FF動作の理論解析

##### 2.1 FFコンプレッサの動作解析

FFコンパングは図1に示す構造を有し、包絡検出回路にFIRフィルタを用い直線位相特性を保証している。

このFFコンパングは、FBループを完全に排除する特徴がある。従来のFBコンパングでは、FBループがコンパング機能を実現し、FB構造が必須であると考えられてきた。このFBループは、直線位相や過渡応答特性において劣化させる原因となり、通話品質上問題となっていた。しかし、FBループはコンパング機能に必須ではなく、FBループを使用しなくてもコンパング機能が実現されることをすでに報告している。そこで、このFB

†愛知工業大学 情報通信工学科(豊田市)

ループを排除した新しいコンパングであるFFコンパングの高調波歪み特性について検討する。解析においては、標準化周波数を8kHzとし入力信号は、式1で与えられるものとする。

$$x(t) = A \sin(\omega t) \tag{1}$$

入力は図1に示すように遅延回路を經由し除算器へ至る主流パスと包絡-平方根回路を経て除算器へ至る分流パスに分岐する。主流パスでは、高調波歪みの発生要因は除算以外には存在しない。一方、分流パスにおいては、入力の包絡を求めるために入力の絶対値を求め、続いてFIRフィルタで低域成分のみ抽出する。

入力の絶対値  $A(t)$  を、式2のようにフーリエ級数に展開し解析を進める。

$$\begin{aligned} A(t) &= |A \sin(\omega t)| \\ &= \frac{4A}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{3 \cdot 1} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos(4\omega t)}{5 \cdot 3} - \frac{\cos(6\omega t)}{7 \cdot 5} - \dots \right\} \end{aligned} \tag{2}$$

従って、ローパスフィルタにおける平滑化は、次の様に記述できる。

$$\begin{aligned} B(t) &= \left[ \frac{4A}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{H(2\omega) \cos(2\omega t)}{3 \cdot 1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{H(4\omega) \cos(4\omega t)}{5 \cdot 3} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{H(6\omega) \cos(6\omega t)}{7 \cdot 5} - \dots \right\} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

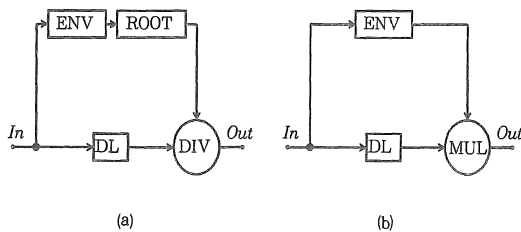


図1. FFコンパングコンプレッサ(a)とエキスパンダ(b)のブロックダイアグラム (ENVは包絡検出回路, ROOTは平方根回路, DLは遅延回路, DIVは除算回路, MULは乗算回路)

ここに、2m段のFIRフィルタの係数がミラー構造を有する時、その周波数応答  $H(\omega)$  の振幅、位相特性は次式で与えられ、その位相は直線位相となる。

$$H(\omega) = \frac{e^{-jm\omega T}}{(2m+1)} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^m \cos(n\omega T) \right\}$$

式3の出力信号  $B(t)$  の平方根を採ることで、包絡信号を得ることができる。

式2, 3で表される演算で生じる処理遅延を、主流パスの信号に付与することで、両パスの時刻を一致させ、両者の商を求めれば、FFコンプレッサの出力  $y(t)$  が次のように得られる。

$$y(t) = \frac{A \sin(\omega t)}{\sqrt{B(t)}} \tag{4}$$

出力  $y(t)$  に対してテイラー展開を施して5次までの近似を行う。

$$\tilde{y}(t) = \sqrt{\frac{\pi A}{2}} \sum_{i=1}^5 k_i \sin(i\omega t) \tag{5}$$

なお、フーリエ係数  $k_i$  は以下に与えられる。

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 - \frac{350H(2\omega) + 35H(2\omega)H(4\omega)}{2100} \\ &\quad + \frac{3H(4\omega)H(6\omega)}{2100} \\ &\quad + \frac{H^2(2\omega)}{12} + \frac{H^2(4\omega)}{300} + \frac{3H^2(6\omega)}{4900} + \dots \\ k_3 &= \frac{350H(2\omega) + 35H(2\omega)H(4\omega)}{2100} \\ &\quad + \frac{3H(2\omega)H(6\omega)}{2100} \\ &\quad - \frac{H^2(2\omega)}{24} - \frac{14H(4\omega)}{420} \\ &\quad - \frac{3H(2\omega)H(6\omega)}{420} + \dots \\ k_5 &= \frac{H^2(2\omega)}{24} + \frac{14H(4\omega) + 3H(2\omega)H(6\omega)}{420} \\ &\quad - \frac{6H(6\omega) + 7H(2\omega)H(4\omega)}{420} + \dots \end{aligned}$$

ただし、 $i$ は正なる奇数

CCITT G.162勧告に従い800Hz, 0dBmの入力に対する解析出力  $y(t)$ を式5から求める。ここで、FIR フィルタの段数 $2m$ を128とし、 $\tilde{y}(t)$ のパワースペクトラムを図2(a)に○印で示す。このFIR フィルタの段数を増大すると高調波歪みが抑圧され、逆に過渡応答が劣化する。この相反する条件を満たすためにFIR フィルタ段数を128段としている。6倍, 8倍高調波は、標準化周波数が8kHzであることから、それぞれエイリアス雑音として3.2kHz, 1.6kHzに折返されている。図2(a)に示した結果から、第3次, 第5次高調波成分は、各々-58.71dBm, -66.79dBmとCCITT 勧告値に対して共に44dB以上のマージンを有し、十分低く抑えられていることが知れる。

2.2 FFエキスパンダの動作解析

FFエキスパンダでは、遅延操作のみ施す主流パスと、分流パスの包絡の積が出力  $z(t)$ となる。今、FFエキスパンダを図1に示す入力  $y(t)$  とすれば、 $z(t)$ は次のように与えられる。

$$z(t) = \frac{2A^2}{\pi} \sum_{i=1}^5 \tilde{k}_i \sin(i\omega t) \tag{6}$$

ここに、

$$\tilde{k}_1 \approx 1 + \frac{H(2\omega)}{3 \cdot 1}$$

$$\tilde{k}_3 \approx \frac{-H(2\omega)}{3 \cdot 1} + \frac{-H(4\omega)}{5 \cdot 3}$$

$$\tilde{k}_5 \approx \frac{-H(4\omega)}{5 \cdot 3} + \frac{-H(6\omega)}{7 \cdot 5}$$

式6に示すように、FFエキスパンダ出力  $z(t)$ が厳密に与えられることができ、近似の必要は無い。図2(b)に、解析出力  $z(t)$ から求まるパワースペクトラムを○印で示す。コンプレッサと同様に、同図から第3次, 第5次高調波成分はそれぞれ-50.16dBm, -58.26dBmであり共にCCITT勧告値に対して36dB以上のマージンを有することが知れよう。

3. シミュレーション実験結果

解析と同じ条件でシミュレーション実験を行い、

FFコンパンダの高調波歪みを検証した。シミュレーションにおいてスーパーコンピュータ CRAY X-MP/14seを用い演算精度を64bitにとり、丸め誤差の混入を可能な限り避け、信号処理本来の歪みを精度良く評価できるように留意した。FFコンプレッサとFFエキスパンダの周波数応答は、図2(a), (b)にそれぞれ示すように、シミュレーション結果と解析結果が良く一致していると言える。FFコンプレッサ出力においては、図2の×印で示す様に基底周波数, 第3次, 第5次高調波成分が、それぞれ-0.93dBm, -59.57dBm, -66.42dBm発生している。これらの値は、2章で行った理論計算とシミュレーション実験で得られた結果を比較すると、約1.4%の誤差が観測されている。これは、解析を5次で打ち切っているために生じている誤差であると思われる。

一方、同図(b)に示すFFエキスパンダにおいても、基底周波数と高調波歪み成分が、それぞれ1.86dBm, -50.73dBm, -57.49dBmと観測されている。エキスパンダの高調波歪みもコンプレッサと同様に、理論計算値と比較し約1.3%の誤差が観測されているが、これも理論解析での打ち切りに

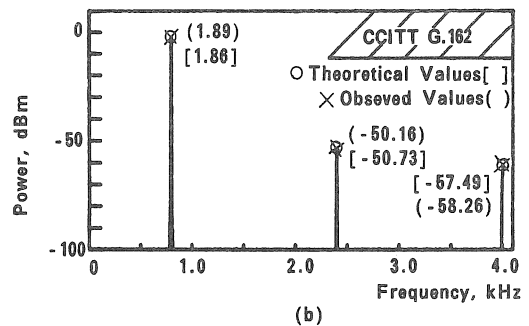
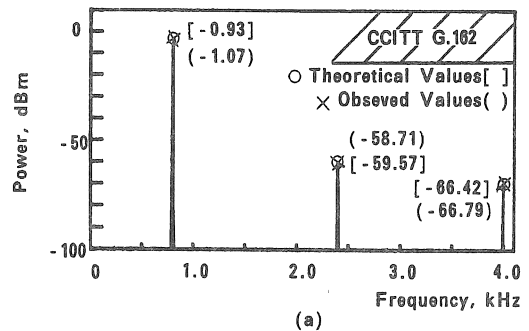


図2. コンプレッサ(a)とエキスパンダ(b)の出力信号のパワースペクトル(2m=128)

起因するものと思われる。FFコンプレッサの高調波歪みは、解析値で-58.7dB, シミュレーションで-58.1dBと誤差0.6dB, またFFエキスパンダの高調波歪みは解析値で-49.9dB, シミュレーション論解析での打ち切りに起因するものと思われる。FFコンプレッサの高調波歪みは、解析値で-58.7dB, シミュレーションで-58.1dBと誤差0.6dB, またFFエキスパンダの高調波歪みは解析値で-49.9dB, シミュレーションで-49.5dBと誤差0.4dBとなるため、5次までの近似で十分な精度が得られる。

#### 4. むすび

FFコンパンダの高調波歪みを解析とシミュレーションの両面から詳細に検討した。この高調波歪みの解析結果は、シミュレーション実験結果によく一致することから、ここで示す解析手段の妥当性を示すものと考えられる。この解析の下で包絡検出に使用するFIRフィルタ特性の検証、FFコンパンダの特性検証を効率良く遂行でき、今後の最適化などに強力な手段を提供できるものと思われる。

#### 参考文献

- [1] 岸 政七, 冠 昇, "FIR形フィルタを用いたデジタル信号処理コンパンダ", 信学技報, CS 82-88, PP.97-104, Nov. 1982
- [2] 岸 政七, 石黒 孝, 小崎康成, "フィードフォワードシラビックコンパンダの提案及びその構成", 信学論, J74-B-I, PP.532-534, Jun. 1991
- [3] 岸 政七, 小崎康成, 石黒 孝, "フィードフォワードシラビックコンパンダの過渡応答特性", 信学論, J74-B-I, PP.697-699, Sep. 1991
- [4] Masahichi KISHI and Tsuyoshi YOSHIDA, "Characteristics of Feed-Forward Syllabic Compressor and its Optimized Configuration", IEEE VTC'92, PP.163-166, May 1992, Denver Colorad
- [5] CCITT RED BOOK FASCICLE III .1: "General characteristics of international telephone connections and circuits", Recommendation G.162, PP.217-223, Oct. 1984

(受理 平成6年3月20日)