

マルチトーン信号クレストファクタ制御方式の検討

柴崎有祈子* 浅見幸司 桑名杏奈 小林春夫 (群馬大学)

Study on Crest Factor Controlled Multi-Tone Signals

Yukiko Shibasaki*, Koji Asami, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード: マルチトーン信号, アナログ IC テスト, 信号生成, クレストファクタ(PAPR)制御
(Multi-Tone Signal, Analog IC Testing, Signal Generation, Crest Factor Control, PAPR Control)

1. はじめに

近年、無線通信で使用される帯域幅はますます拡大している。たとえば、5G では 400MHz 以上、WiGig では 2GHz 近くの帯域幅が採用されている。直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex) 方式は、周波数利用効率や通信品質の高さから 5G や無線 LAN (Wi-Fi, WiGig) の変調方式として利用されている。しかし、ピーク対平均電力比 (PAPR: Peak to Average Power Ratio) が高いため、信号伝達の際にデバイスの非線形性に影響を受けて相互変調歪 (IMD: Inter Modulation Distortion) が発生し、伝送特性が劣化してしまう。こうした理由から、OFDM 方式における非線形歪みの周波数依存性が無視できなくなっており、伝送特性を正確に把握することが重要になっている。従来の低コストの回路システムの非線形性のテストには、2-tone IMD を利用した手法が存在する。しかし、この方法においては一度に限られた周波数しか試験することができないため、広帯域をテストするためには回数を分けて測定する必要があり、テストに時間がかかる。また、隣接チャネル電力比 (ACPR: Adjacent Channel leakage Power Ratio) は標準で定義された変調波形を使用する必要があるが、規格に準拠した波形を生成するのは非常に困難である。

本論文では、こうした問題を解決するために、クレストファクタ (CF: Crest Factor) を調節したマルチトーン信号を利用したテスト手法を検討する。変調波形のクレストファクタは、通信規格によって異なる値を持っている。本論文で述べる手法を用いると、実際の変調波形のクレストファクタと同じ値に調節された波高率を持つマルチトーン信号を生成することができ、テスト信号として使用できる。これにより、従来方式よりも実用に近い試験が可能となるだけでなく、規格で定義されている ACPR と同等の試験をすることもできるようになる。

2. Newman 位相を応用した初期位相設定方法

マルチトーン信号とは、複数のトーン信号から構成される信号で、式(1)のように表される[1]。

$$s(t) = \sum_{k=1}^N \cos\left(\frac{2\pi kt}{T} + \theta_k\right) \quad (1)$$

ただし、N はトーン数、k は周波数、T は 1 周期の分解能、t は時間、 θ_k は初期位相を表している。本論文では、トーン数は N=1024、時間軸は 0 から 8191 の T=8192 とし、各トーン信号は等振幅・等間隔と設定してシミュレーションを行った。ここでは、Newman 位相[2]に係数 C をかけた、式(2)を初期位相として用いる。

$$\theta_k = C \cdot \frac{(k-1)^2}{N} \pi \quad (2)$$

2.1 係数 C とクレストファクタ変動範囲の関係

係数 C について、刻み幅を 0.1 に固定し、C を 1.0 から 100.0 までと、1.0 から 50.0 まで変化させた場合に得られるクレストファクタを比較したグラフを図 1 に示す。

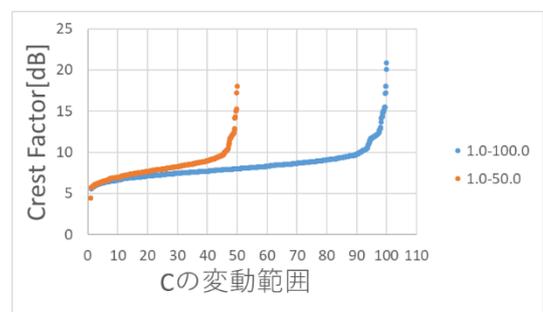


図 1 CF の変動域 (C の範囲を変化させた場合)

クレストファクタの変動域は、C を 1.0 から 100.0 まで変化させた場合はおよそ 4.5[dB]から 21[dB]までの 16.5[dB]、

C を 1.0 から 50.0 まで変化させた場合はおよそ 4.5[dB] から 18[dB] の 13.5[dB] となった。刻み幅が同じ場合、C を変化させる範囲を広くすると、得られるクレストファクタの変動域が広がることわかる。

次に、C を 1.0 から 100.0 まで 0.1 刻み、0.5 刻み、1.0 刻みで変動させた場合に得られるクレストファクタを比較したグラフを図 2 に示す。C の刻み幅を変化させてもクレストファクタの変動域は 4.5[dB] から 21[dB] の間で変化せず、どの刻み幅においても 6[dB] から 10[dB] の範囲でクレストファクタの分解能が高いことがわかった。

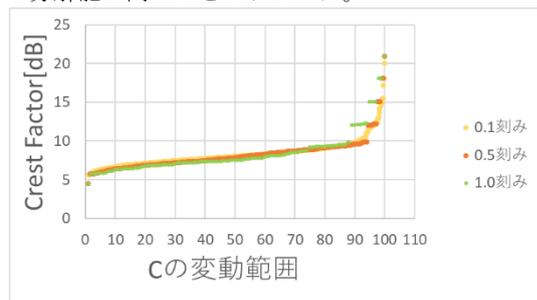
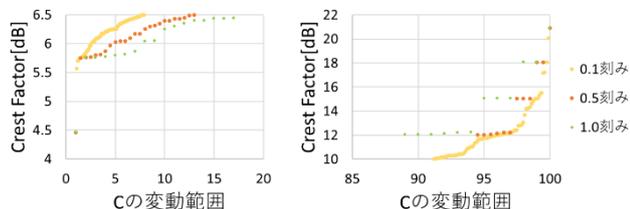


図 2 CF の変動域 (刻み幅を変化させた場合)

図 3 に、図 2 のクレストファクタ 6.5[dB] 以下と 10[dB] 以上を拡大した図を示す。これらの図をみると、0.1 刻みにおいてクレストファクタの分解能が最も高くなっていることから、刻み幅を小さくするほど高い分解能を得られることが分かった。一方で、5.5[dB] 以下と 16[dB] 以上において分解能が低くなってしまっていることもわかる。



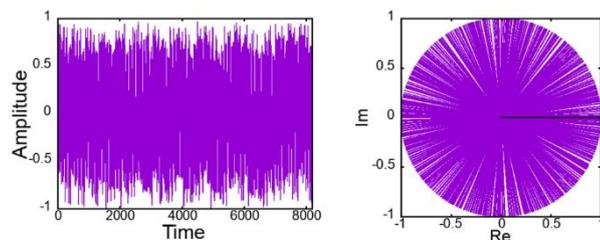
(a)CF=6.5[dB]以下

(b)CF=10[dB]以上

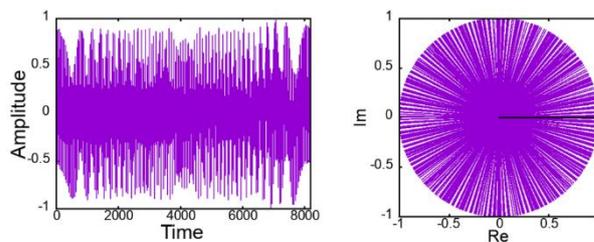
図 3 刻み幅ごとの分解能の違い

2.2 マルチトーン信号の時間軸波形と初期位相

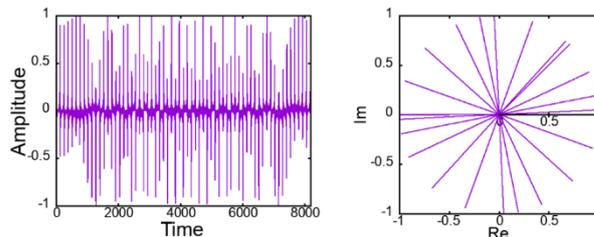
ここでは、C を 1.0 から 100.0 まで 0.1 刻みで変化させたときの、CF=6, 10, 15, 20[dB]におけるマルチトーン信号の時間軸波形 (左) と極座標表示した各トーンの初期位相 (右) を図 4 に示す。時間軸波形は、振幅を 1 に正規化している。



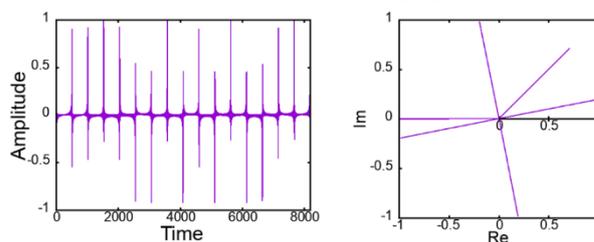
(a)C=54.6 CF=6.01[dB]



(b)C=5.2 CF=10.0[dB]



(c)C=16.0 CF=15.1[dB]



(d)C=64.0 CF=20.1[dB]

図 4 応用 Newman 位相の CF 変動マルチトーン信号

式(2)の初期位相を用いると、広い範囲でクレストファクタを変動させることが可能であるが、クレストファクタが 15[dB] 以上になると時間軸波形にスパイクのようなものが現れている。また、波形品質が悪くなるにしたがって、マルチトーン信号の各トーンの初期位相は、限られた値しか使用されないという傾向があるとわかる。

3. フィボナッチ位相と黄金比位相

2.2 より、マルチトーン信号において使用される初期位相の値が減少すると、波形の質が悪くなる傾向があることがわかった。そこで、極座標平面にまんべんなく初期位相が現れるように、フィボナッチ数列や黄金比を用いて初期位相を設定する。

3.1 フィボナッチ位相と黄金比位相の設定方法

ここでは、フィボナッチ位相と黄金比位相の設定方法について説明する。まずは、フィボナッチ位相について述べる。式(3)のように、数列のはじめの 2 つの位相 (θ_1, θ_2) を決定する。N はトーン数であり、A を変化させることで出現する位相の値が変えることができる。

$$\theta_1 = \theta_2 = \frac{2\pi}{N \times A} \quad (3)$$

これを基準とし、式(4)でフィボナッチ位相を設定する。

$$\theta_k = \theta_{k-2} + \theta_{k-1} \quad (4)$$

次に黄金比を利用した初期位相設定方法について説明する。こちらもフィボナッチ位相同様に、式(3)において1つ目の位相(θ_1)を決定する。そして、式(5)によって黄金比位相を設定することができる。

$$\theta_k = 1.618 \times \theta_{k-1} \quad (5)$$

3.2 クレストファクタ変動範囲の比較

今回のシミュレーションにおいては、式(3)の A を 1.0 から 100.0 まで 0.1 刻みで変化させた。図5にフィボナッチ位相、黄金比位相で得られたクレストファクタの変動域と応用 Newman 位相 (2.1) で C を 1.0 から 100.0 まで 0.1 刻みで変化させたときに得られたクレストファクタの変動域を比較したグラフを示す。

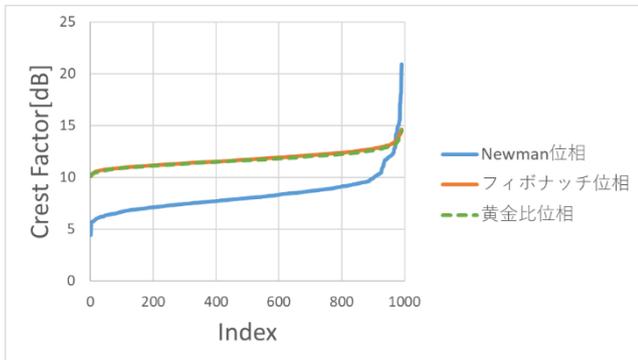


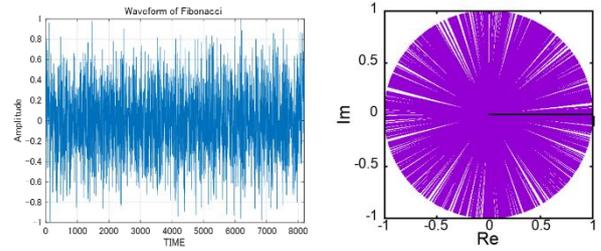
図5 クレストファクタ変動域の比較

図5を見ると、フィボナッチ位相も黄金比位相も共に 10 [dB]から 15[dB]までのおよそ 5 [dB]の範囲でクレストファクタを得られることがわかる。しかし、Newman 位相を応用した初期位相設定法では、得られるクレストファクタの変動域が 4.5[dB]から 21[dB]までの 16.5[dB]であることから、この初期位相設定方式では 3 分の 1 程度の範囲のクレストファクタしか得ることができないことがわかった。

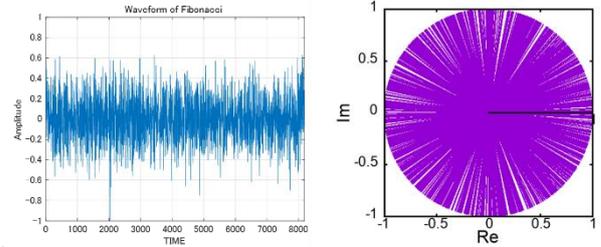
3.3 時間軸波形と初期位相

ここでは、フィボナッチ位相と黄金比位相で生成したマルチトーン信号のシミュレーション結果を示す。

まず、フィボナッチ位相について、CF=10, 14[dB]における時間軸波形(左)と極座標表示した各トーンの初期位相(右)を図6に示す。このとき、A は 1.0 から 100.0 まで 0.1 ずつ変化させ、トーン数は N=1024、時間軸は 0 から 8191 の T=8192 とした。時間軸波形は振幅を 1 に正規化している。



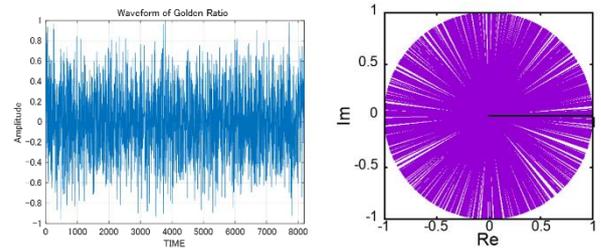
(a)A=79.7 CF=10.1[dB]



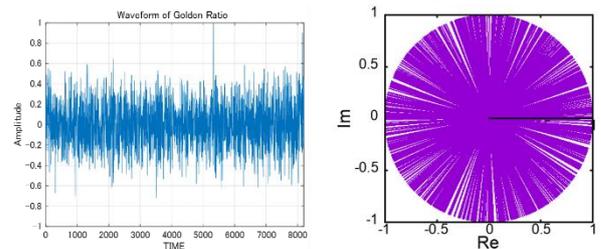
(b)A=97.3 CF=14.0[dB]

図7 フィボナッチ位相のマルチトーン信号

次に、黄金比位相について、CF=10, 14[dB]における時間軸波形(左)と極座標表示した各トーンの初期位相(右)を図7に示す。このとき、A は 1.0 から 100.0 まで 0.1 ずつ変化させ、トーン数は N=1024、時間軸は 0 から 8191 の T=8192 とした。時間軸波形は振幅を 1 に正規化している。



(a)A=29.7 CF=10.2[dB]



(b)A=39.8 CF=14.0[dB]

図7 黄金比位相のマルチトーン信号

図6, 7を見ると、フィボナッチ位相と黄金比位相のマルチトーン信号は、同じような時間軸波形と初期位相を持つことがわかる。また、Newman 位相に係数 C をかけて初期位相を設定したマルチトーン信号のシミュレーション結果(図4)を比較すると、クレストファクタが大きくなっても時間軸波形の品質にあまり変化はなく、ランダムノイズに似た信号になることがわかった。また、極座標表示したグラフを見ても、Newman 位相の結果とは異なり、使用する初期位相が極座標平面にまんべんなく現れるように調節できて

いることがわかる。

4. スペクトログラムの比較

2.2 と 3.3 より、マルチトーン信号の時間軸波形の品質と極座標平面に出現する初期位相の種類の数になんらかの相関があることがわかった。ここでは、応用 Newman 位相とフィボナッチ位相で生成したマルチトーン信号の違いを更に分析するために、それぞれのスペクトログラムを比較する。スペクトログラムは、時間軸波形をいくつかのセグメントに分けて、短時間フーリエ変換を行うことで作成することができる。例として、図 8 に $C=1$ における Newman 位相のマルチトーン信号を、図 9 に $A=1$ のフィボナッチ位相のマルチトーン信号の時間軸波形（左）とスペクトログラム（右）を示す。今回は、1つのセグメントを 128 ポイント、オーバーラップを 64 ポイント（セグメント長の半分）に設定して、計算を行った。

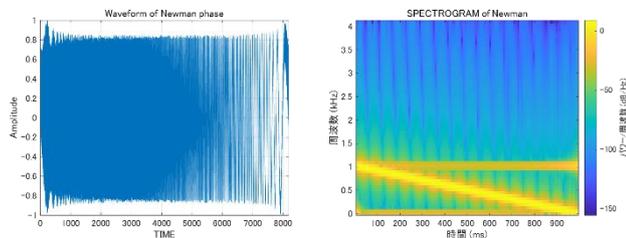


図 8 Newman 位相の時間軸波形とスペクトログラム

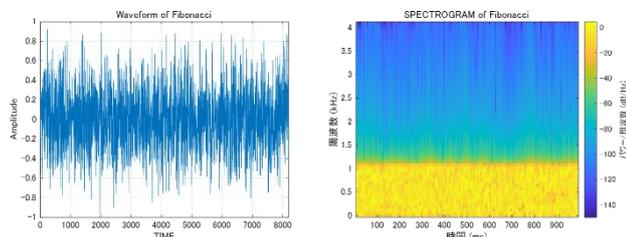
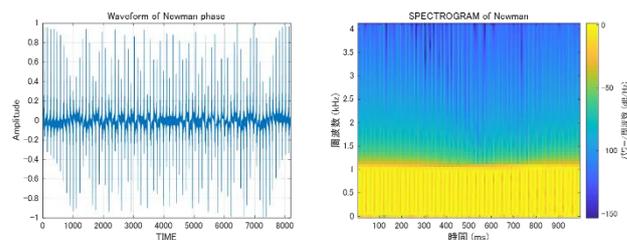


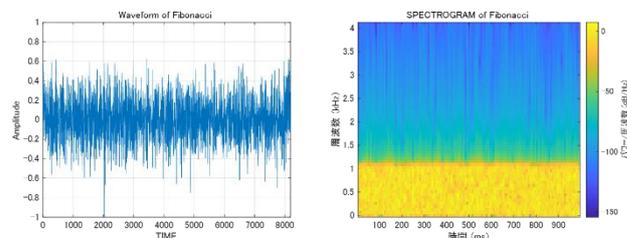
図 9 フィボナッチ位相の時間軸波形とスペクトログラム

スペクトログラムは、横軸が時間を表し、縦軸が周波数を表しており、各点の色がその時点における周波数の振幅を示している。図 8 のスペクトログラムを見ると、0[ms]に 1[kHz]程度の最も高い周波数が存在しており、そこから時間が経つにしたがって、周波数が一定の傾きで低くなっており、Newman 位相のマルチトーン信号には周波数局在性が確認できる。それと比較して、図 9 のスペクトログラムを見ると、時間軸全体に 0[Hz]から 1[kHz]までの周波数がランダムに存在しており、周波数局在性がないことがわかった。

次に、応用 Newman 位相とフィボナッチ位相で生成したマルチトーン信号において、同じクレストファクタを持つ時間軸波形のスペクトログラムを比較する。図 10 にクレストファクタが 14[dB]の場合における比較結果を示す。



(a)Newman 位相 : $C=13.3$ $CF=14.2$ [dB]



(b)フィボナッチ位相 : $A=97.3$ $CF=14.0$ [dB]

図 10 クレストファクタ 14[dB]における比較

図 10(a)を見ると、応用 Newman 位相で生成したマルチトーン信号のスペクトログラムには筋のようなものが確認できる。これは、図 8 で見られた周波数局在性が形を変えて出現しているためと考えられる。それに対して、フィボナッチ位相については、図 9 同様に周波数局在性がみられなかった。このことから、周波数分布のランダム性が優れていると、ランダムノイズに近い波形を生成できることが明らかになった。

5. まとめ

本論文では、応用 Newman 位相・フィボナッチ位相・黄金比位相を利用することで、マルチトーン信号のクレストファクタを変動させられることを示した。また、これらのシミュレーション結果を比較することで、信号品質と周波数局在性の関係を明らかにした。

今後の課題としては、この手法を用いてクレストファクタを調節したマルチトーン信号が、従来方式と遜色ないテスト精度を得られるかを確認することが必要である。また、本論文におけるクレストファクタ変動手法では、あらかじめ各トーン数 N における C とクレストファクタの関係を求めてから、所望のクレストファクタをソートする必要がある。今後は、クレストファクタが変動することによる時間軸波形やスペクトログラムへの影響について更なる分析を行い、パラメータを入力すると所望のクレストファクタが求まるような理論式の導出を行いたい。

文 献

- [1] 檜橋, 野島, “マルチトーン信号のピーク対平均電力比 (PAPR) を低減する初期位相設定法,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J78-B-II, no.11, pp.663-670, '95/11.
- [2] D. J. Newman, “An L_1 extremal problem for polynomials,” Proc. Amer. Math. Soc., no.16, pp. 1287-1290, Dec. 1965.