

## 地デジや無線 LAN、ケータイで使われる OFDM 変調を LTspice で理解する (後編)

周波数間の直交性を理解して OFDM の原理を理解する

著者: 石井 聡

### はじめに

前回は OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) …直交周波数分割多重を理解する前振りとして、IQ 変復調系について説明しました。なんだかよく分からないと思われる I/Q 信号伝送とは、 $90^\circ$  位相がずれた状態を用いて別々の伝送経路をつくることのできる「直交」という特徴があること、それはお互いに影響を与えない/受けない関係であると説明しました。

IQ 変復調系においては、I 相と Q 相が  $90^\circ$  異なることで直交関係を実現しているわけですが、この技術ノートでは、この前後編の本来の目的である OFDM (これまたイメージがつかみづらい) について、ひきつづき「直交」という視点から LTspice を使いつつ解きほどこいていきたいと思います。

### 遙かなる思い出の Vibroplex (モールス・キー) を前振りにして

アマチュア無線をやっていたころは「モールス符号なら遠くまで飛ぶ」という程度の理解でありましたが、信号伝送理論を理解すると(狭帯域通信という点がまずポイントですが)、「なるほどね」と深く頷くことができるようになりました。基本は帯域制限という考え方です(シンボル間距離という見方もできますね)。

私はこの「遠くまで飛ぶ(届く)」というモールス符号通信(CW 通信。CW は Continuous Wave; 連続波ですが、通信の世界ではモールス通信を CW 通信といいます)が大好きでした。最初は安い縦ぶれ電鍵(キー)を使っていましたが、ある日、やはり自動的に短点・長点を発生できるモールス符号発生器(デジタル・キーヤ)が欲しいと思いました。貧乏学生でお金もなかったもので、雑誌 CQ Ham radio だか Ham Journal にモールス符号発生器のロジック回路が掲載されているのを見つけ、自作しようと思いましたが。いまでは記憶がありませんが、たぶん(当時を考えれば)4000 シリーズ CMOS だったと思います。IC とユニバーサル基板を秋葉原に買いに行き、自作で製作してみました。

キーは Vibroplex 社という高級ブランドの横ぶれ式のもの「どーしても」欲しくて、安いバイトでためた貴重なお金を「清水の舞台ダイブ」で秋葉原にて購入しました。店のショーケースの前でだいぶ躊躇していた記憶があります(笑)。

最近、自室の奥のほうからそのキーを見つけることができました(図 1)。ホコリはかぶっていましたが、さすが一級品です! 錆が少し浮いている程度です…。また今でも Vibroplex のキーが販売されているのをネットで見つけました[1]。買った機種と全く同じものが、30 年以上を経過した今でも販売されているのは驚異的なことです。当時私が購入したものは \$212 と表示さ



図 1. ハタチ前後のことだと思うが、貴重なバイト代を使って清水の舞台ダイブで買った Vibroplex の横ブレ式キー。30 年以上も自室の奥のほうでホコリをかぶっていたが流石一級品! 錆が浮いているがほとんど劣化していない

れていますが、ショーケースの前でだいぶ躊躇していた貧乏学生からすれば、相当高価なものだったわけでしょう。

購入した Vibroplex キーと自作した符号発生器を接続してテストしてみると、なんだかスクイーズ機能(短点側と長点側を同時にオンすると「ツートツートツート」となるもの)が、どちらかの側を(たしか)先にオフすると動きがおかしく、「これでは使えないぞ…」という事態になってしまいました。当時の実力では CMOS ロジックの動きを解析する、ロジアナで観測するなどできませんでしたので、修正はあきらめました。この機能は「まあ我慢すれば…」というところでした。

つづいて無線機と接続して実際に CW 信号を出してみると、送信電波が CMOS 入力に回り込んで、動作が完全におかしくなってしまいます(涙)。これは致命的で、結局はキーも符号発生器も使えないという事態になってしまったのでした。

今であれば符号発生器のキー入力にコンデンサを接続して高周波をバイパスすればよいのだとアイディアを出せるころですが、ハタチ前後の素人工作ではそんなことも分かりません。それでも「将来使えるだろう」と部屋の奥底にしまっておいたものが図 1 のキーなのでした。

【注】ちなみに次の TNJ-062 で「大学キャンパス近くのおんぼろアパートに 4 年間住んでいた」と記述しているが、アマチュア無線は千葉の実家に帰省時に楽しんでいたもの

アナログ・デバイス株式会社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許その他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイス社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本誌記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。  
©201920 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

モールス符号によるパイルアップも線形性と直交性のうえで成り立っている

TNJ-060 で示した PSK は Phase Shift Keying ですが、この Keying というのがモールス通信での「キー」に相当するといわれています。最新のデジタル通信の用語の語源がモールス通信というのなかなか粋な気もしますが…。

さて、アマチュア無線では一つの局に対して複数の他局が同時に通信開始をリクエストする、「パイルアップ」という通信手段というか、状態があります。たとえば自局がモールス通信で複数の他局からパイルアップを受けるとすれば、この複数の他局の信号は重なりあって、それぞれ合成されて聞こえます。これは「信号の足し算」であり、より工学的には「線形」と言えます。「重ね合わせ」でもあります。

パイルアップを受けた自局は、通信する相手方を選択するために、複数の局からひとつの局のモールス符号を抽出する必要があります。複数の局の信号が重なり合って聞こえるなか、ひとつの局のモールス符号を抽出するには、自分の頭のなかで（耳で）、1 局の符号に集中し、他局の符号と頭のなかで（耳で）弁別する必要があります。これは宴会会場などで、がやがやしているなかで一人の声を聴き分けることと同じです。自分の頭（耳）が受信直交系を形成しているといえるものです。

このパイルアップの話を「直交性」の例にするにはちょっと無理やり感もありますが（汗）、ともあれ、この線形性と直交性を維持することが現代のデジタル無線通信、ましてやこの技術ノートでご紹介する OFDM で非常に重要なのです。以降で LTspice のシミュレーションを使ってこのようすを見えます。

OFDM の超基本的原理

図 2 のように OFDM は複数のキャリア（このひとつひとつを OFDM では「サブ・キャリア」と呼びます。キャリアは TNJ-060 で説明した搬送波に相当します。というより搬送波の英語訳がキャリアです。業界的には 1 本 1 本の…と言います）にひとつの情報源の情報を分割して並列に伝送するものです。

図 3 は 3 本のサブ・キャリアを示したものです。このように隣同士のサブ・キャリアの間隔が十分に空いていれば並列伝送はできそうだと直観的に感じるでしょう。しかし OFDM では図 4 のように（これも 3 本のサブ・キャリア）隣同士のサブ・キャリアは相互に重なり合っています。直観的に考えると「ホントにこれで伝送できるの？」と思われる周波数関係に見えます。

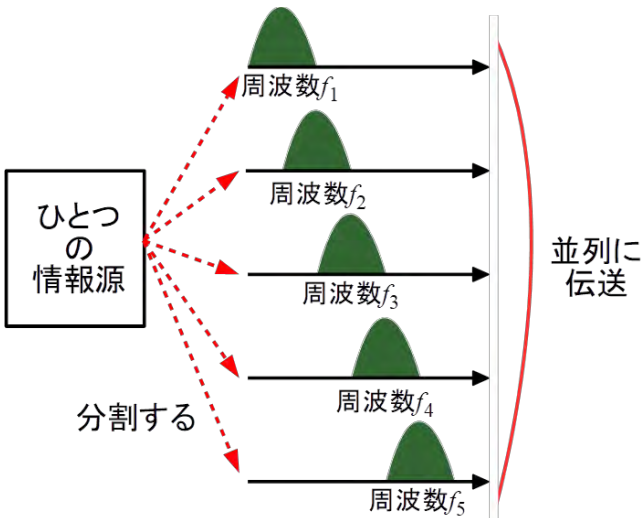


図 2. OFDM は複数のサブ・キャリアにひとつの情報源のビット情報を分割して並列に伝送するもの

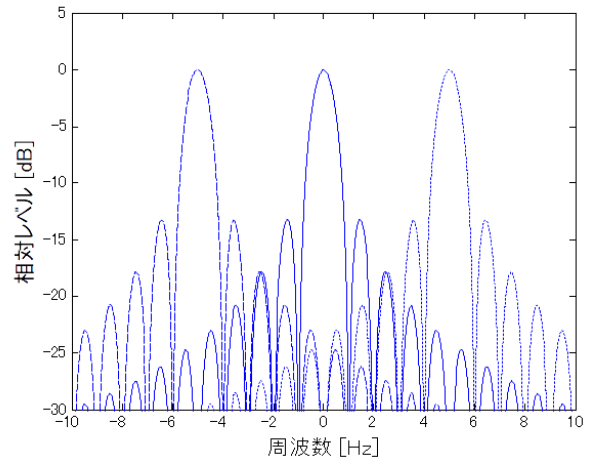


図 3. 隣同士のサブ・キャリアの間隔が十分に空いていれば並列伝送はできそうだと直観的に理解はできる

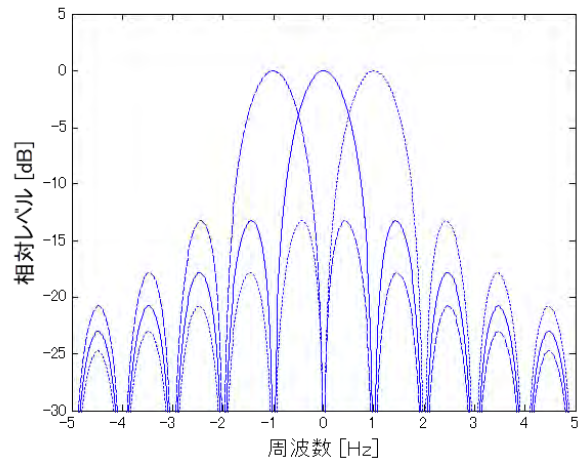


図 4. OFDM のサブ・キャリアは隣同士が重なり合っている (サブ・キャリア本数を 3 本とした)

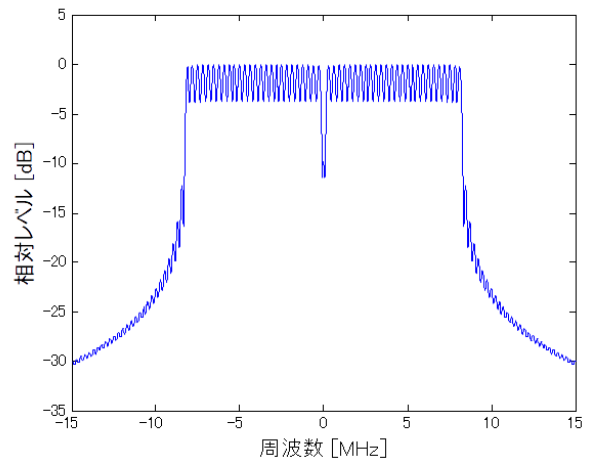


図 5. OFDM の信号を周波数領域で表したものの (無線 LAN の IEEE 802.11a/g の 52 本のサブ・キャリアとしてのシミュレーション)

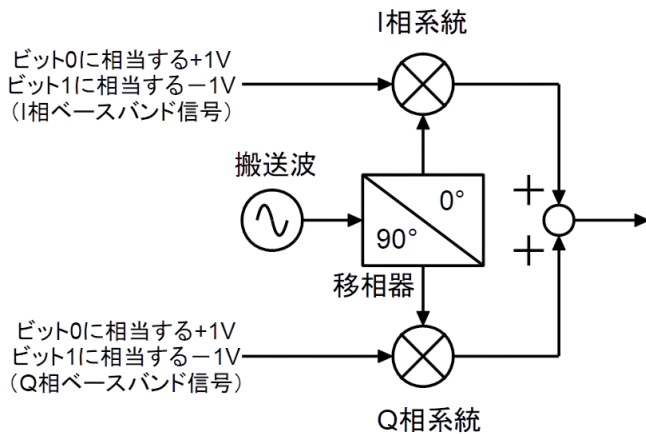


図 6. QPSK 変調回路 (OFDM 変調回路も同じ)

しかし OFDM はサブ・キャリア間で相互に影響を与えない／受けない (つまり「直交している」) 状態を維持したまま、可能な限り狭い周波数間隔でサブ・キャリアを配置したのになります。IQ 変復調では搬送波 (キャリア) の位相を  $90^\circ$  ずらして 2 系統の伝送を直交させましたが、OFDM ではサブ・キャリアごとで周波数をずらして (それも可能な限り狭い周波数間隔として) 複数系統の伝送を直交させるものなのです。

### OFDM 変調波の周波数スペクトル例

図 5 は 52 本のサブ・キャリアをもつ OFDM 変調波のスペクトルの例です (無線 LAN の IEEE 802.11a/g)。さきの説明のように隣同士のサブ・キャリアが重なり合っていることが分かります。情報源の情報をサブ・キャリアごとに分割して、並列に情報を伝送します。

上記のモールス通信のパイラップと同じように、個々の複数のサブ・キャリア変調波が重なり合い、信号の足し算として、OFDM 変調波が形成されることとなります。モールス通信のパイラップのことを考えると (実際の通信を聞いたことのない方はイメージができないかもしれませんが…汗)、直観的にも「サブ・キャリアごとの周波数が異なっているし、OFDM 変調波というのは複雑な時間波形では？」と感じるのではないのでしょうか。

### OFDM 変調波の時間波形をみってみる

図 6 は QPSK 変調回路です。以降にも示すように OFDM 変調回路も構成は同じです。I 相系統はコサイン波、Q 相系統はコサイン波が  $90^\circ$  進んだ (マイナス・サイン波) の搬送波になります。

この上側の I 相系統の回路 (乗算器) に、ビット 0 に相当する +1V が加わると  $0^\circ$  位相、ビット 1 に相当する -1V が加わると  $180^\circ$  位相の PSK 変調波が得られます。下側の Q 相系統の回路 (乗算器) 出力では  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  位相の PSK 変調波が得られます。QPSK 変調波は上側の I 相変調波と下側の Q 相変調波の足し算になります。これは TNJ-060 で示したとおりです。この  $\pm 1V$  の信号 (変調情報) のことを「ベースバンド信号」といいます。

シリアル伝送での 1 ビットに相当する時間 (これを「1 シンボル時間」といいます。多値変調ではビットに代わりシンボルという用語を用います) で PSK 変調波の時間軸波形を見ると、PSK 変調波は、全長にわたり非常に単純な波形 (それぞれ位相は異なりますが単なる正弦波) であることも TNJ-060 で示したとおりです。これはベースバンド信号がそれぞれ  $\pm 1V$  で一定だからです。

図 7 は私が Excel で自作したマクロで発生させた、OFDM のベースバンド信号 (変調情報) の時間軸波形です。これは 16 本のサ

ブ・キャリアにそれぞれ異なるビット情報を乗せて生成してみたもので、図 6 の QPSK 変調回路の I 相と Q 相それぞれのベースバンド信号と同じものに相当します。図 7 のような OFDM のベースバンド信号を、図 6 の回路により単一周波数で位相が  $90^\circ$  異なるふたつの搬送波に対して IQ 変調し合成することで、16 本のサブ・キャリアをもつ OFDM 変調波が生成できるのです。

繰り返しますが、図 7 のベースバンド信号波形は 16 本のサブ・キャリア情報を含んだものです。QPSK 変調波のベースバンド波形は一定の  $\pm 1V$  でしたが、OFDM のベースバンド波形は非常に複雑になっていることが分かります。

なお難しい話は (ここでは) 良しとして、無線通信信号の信号処理や理論解析をするうえでは、図 5 の OFDM 変調波の無線周波数スペクトルで信号処理や解析をする必要性は低く、図 7 のベースバンド信号波形で解析していくことが基本です (QPSK や PSK も同じです)。

最初の話に戻すと、図 4 や図 5 のように周波数領域では隣同士のサブ・キャリアが重なり合った、また時間軸ベースバンド波形としても図 7 のように複雑な OFDM 変調波の復調は、とても難しいものではと予感させるものではないでしょうか。

### LTspice で OFDM 変調波を発生させてみる

図 8 は LTspice でサブ・キャリアの本数を 4 として発生させた OFDM の各サブ・キャリアです (I 相成分のみ)。それぞれ簡単化するために PSK 変調にしています [実際に OFDM で使用される変調方式は、より伝送密度 / 伝送効率の高い QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 変調が使用されます]。この例では各サブ・キャリアを変調する情報信号は、低いサブ・キャリア周波数から +1V, -1V, -1V, +1V としています。それぞれ 1, 2, 3, 4kHz のキャリアにおける PSK 変調波相当ということです。

この図では 1 シンボル時間を 1msec にしています。この 1msec に対して、一番低いサブ・キャリアの周波数は 1msec の逆数の 1kHz となり、この整数倍でサブ・キャリアの周波数が配置されます (図 8 の例では 1, 2, 3, 4kHz)。

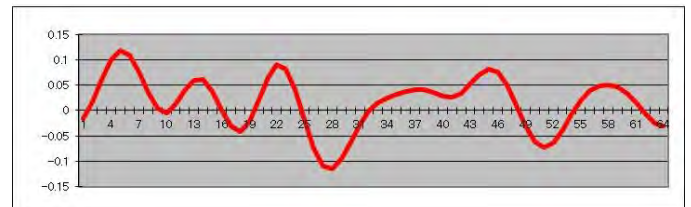
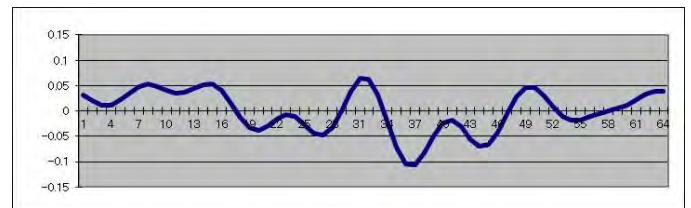


図 7. Excel で自作したマクロで発生させた時間領域で表した OFDM の 1 シンボル波形 (16 本のサブ・キャリア。上が I 相で下が Q 相。4 倍のオーバ・サンプリングで IFFT したもの)



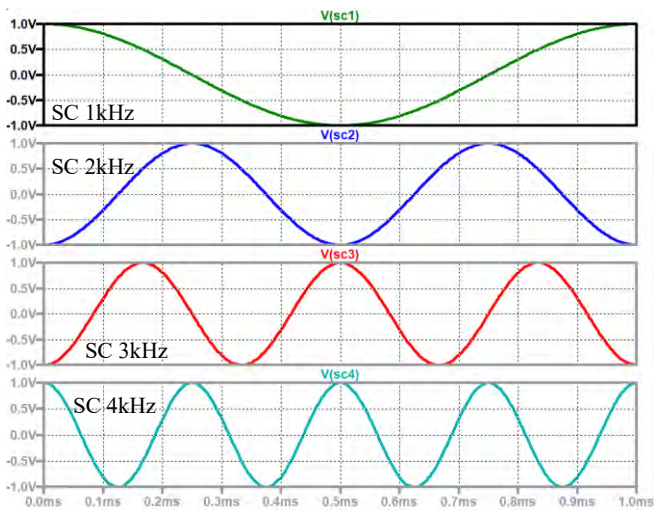


図 8. LTspice で発生させた OFDM の 4 本のサブ・キャリア = SC (情報信号は、低いサブ・キャリア周波数つまり上から+1V, -1V, -1V, +1V)

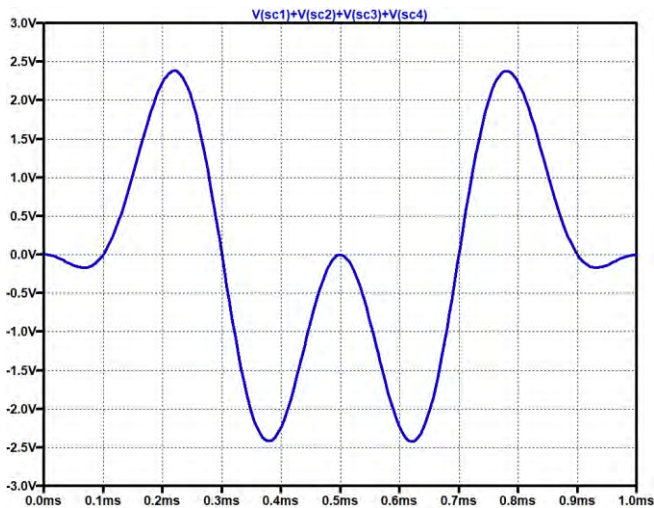


図 9. 図 8 の 4 本のサブ・キャリアを合成した OFDM 変調波

図 9 は図 8 の信号を合成させた OFDM 変調波です。同図は I 相のサブ・キャリア 4 本を合成した波形ですが、ここでも「こんな正しく復調できるの？」と思わせるような複雑な波形に(たった 4 本のサブ・キャリアでも)なっています。

なお実際の信号伝送では、I/Q 相の直交系で伝送されますから、この条件の QPSK 変調かつ 4 本のサブ・キャリア、1 シンボル時間 1msec で、合計 8kbps の情報を一度に伝送できるようになります(図 8, 図 9 で示される I 相のみで 4kbps)。

### 4 本のサブ・キャリアの OFDM を復調する

世間で謂われている「OFDM の復調は FFT; Fast Fourier Transform で処理する」という技術的解説は正しいのですが、それだけの説明では全く動作のイメージがつかないのではないのでしょうか。

しかし実際には、これまで説明してきた IQ 復調の考え方(送信側の搬送波と同じ周波数と位相の信号を掛け算することで復調結果を得る)と、OFDM の復調は、本質点には全く同じもの(直交関係を利用するもの)なのです。ここでも実は、TNJ-060 から続く底流である「重ね合わせ」という考え方そのものなのです。

### LTspice でやってみる

理論的な背景を説明するまえに、「ホントかいな」ということで、LTspice でこの 4 本のサブ・キャリアに相当する I 相成分のみの OFDM 変調波を「搬送波と同じ周波数と位相」つまり「送信側サブ・キャリアと同じ信号」と掛け算するという処理を実際の波形で見ましょう。

図 10 はこれを I 相に対して実際におこなってみるシミュレーション回路です。TNJ-060 で I 相と Q 相は直交関係であると説明しました。その関係から Q 相の信号がいかようでも、I 相の復調結果には影響を与えないので(I/Q が逆の関係でもしかり)、ここでは I 相の OFDM 変調波だけに注目しています。

I 相復調系に加わる OFDM 変調波は図 9 の波形を用います。この OFDM 変調波と、4 本のサブ・キャリアの周波数に相当する(それも I 相側と同じ位相の) 1, 2, 3, 4kHz の信号とをそれぞれ乗算します。

図 11 にシミュレーションで得られた波形を示します。上から、受信側で乗算するサブ・キャリア相当の周波数を 1, 2, 3, 4kHz とした(かつ各サブ・キャリアの I 相側と同じ位相)、乗算結果の波形です。ちょっと分かりづらいかもしれませんが、なんとなく +1V, -1V, -1V, +1V に相当する DC オフセットが得られていそうだと感じることができるとおもいます。実は間違いなく 4 本のサブ・キャリアごとで直交関係になっているのです。ホントかどうか、もう少し「重ね合わせ」というキーワードからみてみましょう。

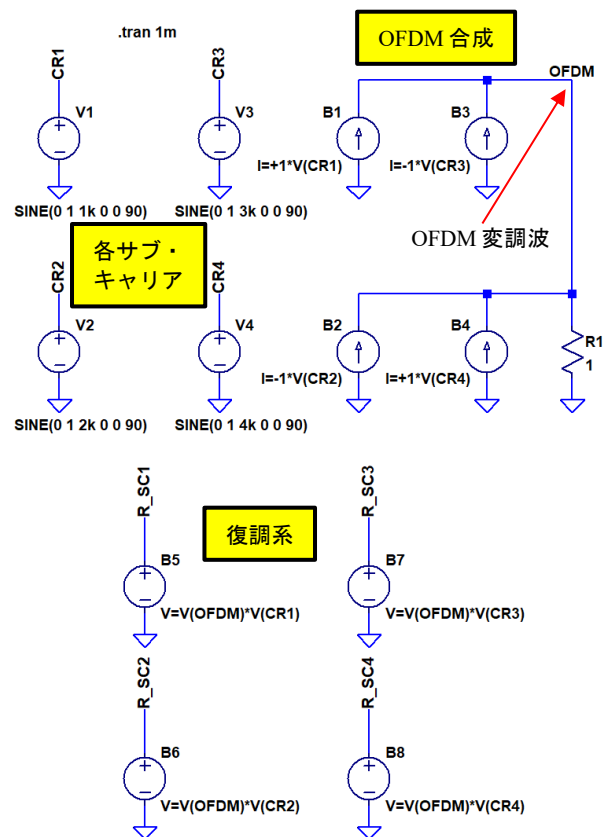


図 10. OFDM 変調波を復調する回路 (I 相のみ)

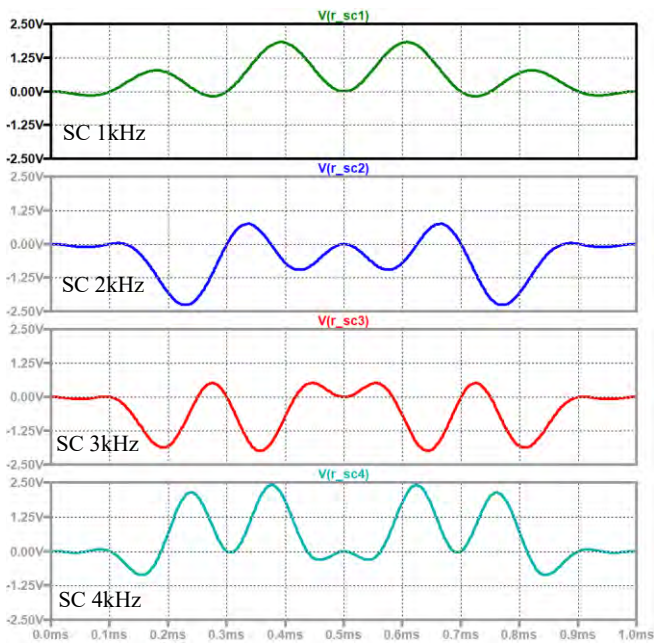


図 11. 図 10 の 4 サブ・キャリア (SC) OFDM 変調波を復調した結果。全体を平均したかたちで見ると、低いサブ・キャリア周波数 (上のプロット) から +1V, -1V, -1V, +1V に相当する DC オフセットが得られているように見える

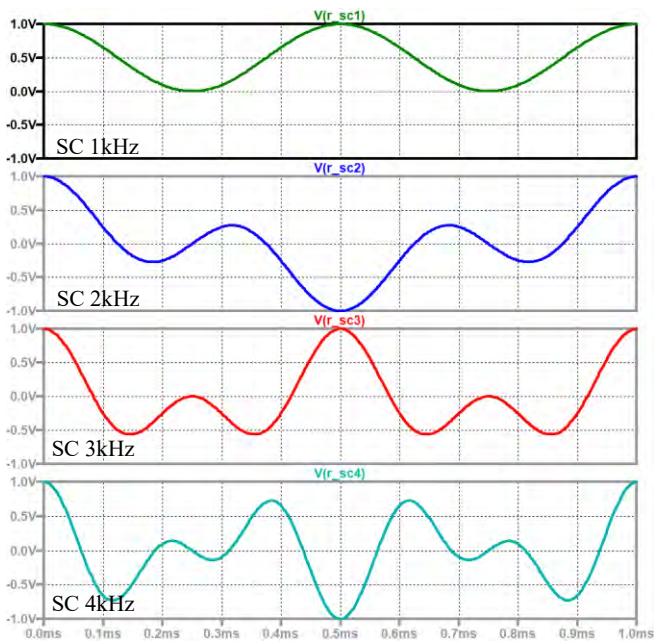


図 12. サブ・キャリア (SC) ごとを 1kHz の一番低いサブ・キャリアの周波数と乗算させた復調波形 (1kHz 同士以外では平均値がゼロとなり「直交している」ことが分かる

図 12 は図 8 の OFDM 変調波の各サブ・キャリアの成分 (OFDM 変調波全体ではなく、各サブ・キャリアごと) を、一番低いサブ・キャリアと同じ周波数 1kHz の正弦波と乗算させた波形です。

1kHz のサブ・キャリアとの乗算結果 (一番上) は +0.5V の DC 成分が観測されますが、それ以外のサブ・キャリア (2, 3, 4kHz) と 1kHz との乗算結果は DC 成分がありません。

これは OFDM 変調波として「重ね合わせ」が行われる前の波形ですが、線形関係で考えれば、重ねあわされた結果 (OFDM 変

調波) としても、当然ながら異なるサブ・キャリア周波数間の影響は無い、つまり「直交している」ことが分かります。

### 周波数軸に戻ってみると

ここで示した「1 シンボル長が 1msec で、サブ・キャリアの周波数間隔が 1kHz」というのは、図 4 で示したサブ・キャリアが重なりあった状態なのです。時間軸で復調波形を見てみると、それぞれ直交している状態だと分かりましたから、図 4 のように周波数軸でサブ・キャリアが重なりあっても、問題なく、サブ・キャリアごとに直交したかたちで復調できるわけです。

### OFDM は FFT で復調する

このようなかたちで OFDM の復調が可能であることは分かりました。続いて上記に示した、世間で謂われている「OFDM の復調は FFT で処理する」ということの実際の操作について考えていきましょう。

FFT は「Fast Fourier Transform」、高速フーリエ変換というのですが、これは離散値を取り扱う Discrete Fourier Transform (離散フーリエ変換) という処理を高速に実行できるアルゴリズムです。そしてその根源を手繰ると「Fourier Transform」、フーリエ変換というものに辿りつきます。フーリエ変換は、実用上で考えると、時間軸の波形を周波数軸に変換する操作と位置づけることができます。数学的概念自体は「時間軸を周波数軸に」というものでもないのですが、そのように適用することで、現実の電子回路の信号処理動作を適切に解析することができます。

### FFT という話でなくてもフーリエ級数で考えられる

OFDM は整数倍の周波数のサブ・キャリアを使って情報伝送するものと説明してきました。これをフーリエ変換という視点で考えてみましょう。たとえば図 9 のような OFDM 時間波形を周波数軸に変換 (フーリエ変換) してみれば、サブ・キャリアごとに分解できるわけで、それから「変調情報成分を取りだせるのではないかと」と直観的に発想できるかと思えます。

たしかにそのとおりで、OFDM の復調は、連続した受信波形から目的とする 1 シンボル時間の波形を切り出し、それをフーリエ変換、実際は FFT を行い、OFDM 時間波形を周波数軸に変換します。そしてそこからサブ・キャリアごとの変調情報を取り出すこと (復調) ができます。

ここで FFT とかいう小難しいような計算手段を考えるまでもなく、フーリエ変換の基本であるフーリエ級数 [2], [3] を持ちこむことで、この OFDM の復調動作を説明できます。

フーリエ級数はある周波数を基底とし (直流成分もありますが)、その整数倍の正弦波を組み合わせることで (それぞれ「重ね合わせ」することで) 任意の繰り返し信号波形を表すことができるものです。式で表すと

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_0 t + b_n \sin 2\pi n f_0 t) \quad (1)$$

[2]とか数学的な説明では、変数を  $x$  で表していますが、時間信号を表すための理解度を優先して、式(1)では時間変数  $t$  を用いています。 $x = 2\pi f_0 t$  と考えていただくとよいでしょう。ここで  $n$  は次数 (基底周波数  $f_0$  の  $n$  倍の高調波を示します。直流相当も  $n = 0$  で  $a_0/2$  が相当します) になります。

OFDM はシリアル伝送での 1 ビット時間に相当する「1 シンボル時間」での有限長の波形で考えること、また複数の整数倍周波数 (同一周波数間隔) のサブ・キャリアを用いることから、基底周波数とその  $n$  次の高調波をもつ繰り返し信号に対して応用できるフーリエ級数が、OFDM でも活用できそうだと、ここでも直観的に感じるところではないでしょうか。



# アナログ電子回路技術ノート

TNJ-061

そして OFDM 変調波の I 相だけを考えるのであれば (Q 相はこれまでの TNJ-060 から続く説明の「直交関係」としてご理解いただけたように、検討から除外できるので)、式(1)は

$$I(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_0 t) \quad (2)$$

と表すことができます。ところで次数  $n$  が含まれる  $\cos 2\pi n f_0 t$  だなんて、整数倍の周波数のコサイン波つまり I 相信号になっているじゃないですか…。確かになんだか OFDM を予感させますね (笑)。

さてフーリエ級数において、ある繰り返し信号波形 (実際は 1 シンボル長の I 相信号である  $I(t)$ ) のフーリエ級数係数  $a_n$  は

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [I(t) \cos 2\pi n f_0 t] dt \quad (3)$$

を求めます。ここで得られるフーリエ級数係数  $a_n$  はそのコサイン波の振幅ですから、「I 相の送信情報信号」になるわけですから (図 8 以降で +1V, -1V, -1V, +1V と説明したもの)。この式のなりたちを考えると、目的とする信号  $I(t)$  に対して基底周波数、もしくはその  $n$  倍の周波数のコサイン波をそれぞれ掛け算して、その結果を積分するという操作になります。

これは目的とする信号波形と、基底周波数もしくはその  $n$  倍の高調波との関連性を求めることになり、実はここまで見てきた IQ 復調や図 10、図 11 の OFDM 復調と全く同じ考え方といえます。上記の式(3)は図 10、図 11 と全く同じ「うごき」になっているのです。また次数  $n$  を考えるということは、サブ・キャリアの  $n$  本目を考慮するということと等価になるわけです。

OFDM を実際に復調する FFT (DFT) も、上記と全く同じ計算をしているのです。

式(3)を LTspice でシミュレーションしてみましょう。図 10 の回路に式(2)の積分操作に相当する「積分回路」を付加してみます。この回路を図 13 に示します。乗算は電流出力の BI モデルを利用し、その電流出力をコンデンサに充電させるような回路です。ic コマンドでコンデンサの端子電圧初期値を明示的にゼロにしています。

シミュレーション結果を図 14 に示します。1 シンボル時間の最後に各コンデンサの電圧、つまり時間積分した結果がもともとの送信情報の +1V, -1V, -1V, +1V (それぞれ低いサブ・キャリア周波数から) に対して、+0.5V, -0.5V, -0.5V, +0.5V として見事に得られていることが分かります (0.5A を 1msec の間 1mF に充電させることで 0.5V となります)。

## まとめ

二つの技術ノートに亘って説明してきました、最新のデジタル変復調方式である OFDM。「FFT とか全く意味不明」と思われるかもしれませんが、このように I 相と Q 相の直交性、整数倍周波数の搬送波間の直交性を理解すれば、その基本的なところは単なる従来技術とほぼ同じだということが分かります。

また FFT を用いた復調の考え方も別に難しい話ではなく、フーリエ級数の考え方と全く同じであることも分かりました。

なお本稿では説明しませんが、送信側では IFFT (逆 FFT) を用いて OFDM 変調波を生成します。

このように基本理論や基本数学と最新技術との関係は、飛躍しているものではなく、「基本」の積み重ねで橋渡しされているものが多いことに気がつきます。「基本」がいかに大事か、そしてそれをどのように応用できるかが重要というところでしょうか。

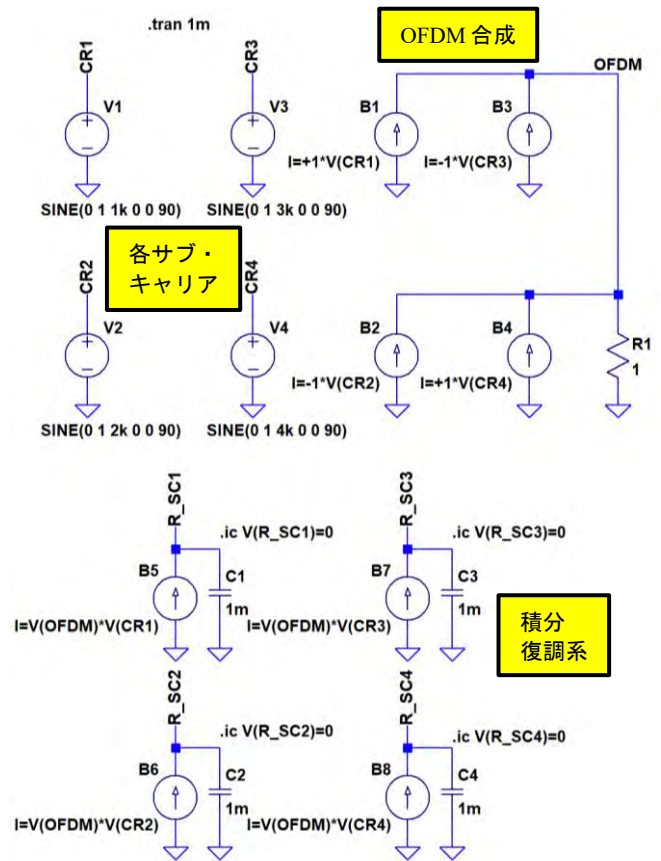


図 13. 式(3)のフーリエ級数係数を求めるのと同じ方法で OFDM 変調波を LTspice で復調してみるシミュレーション回路

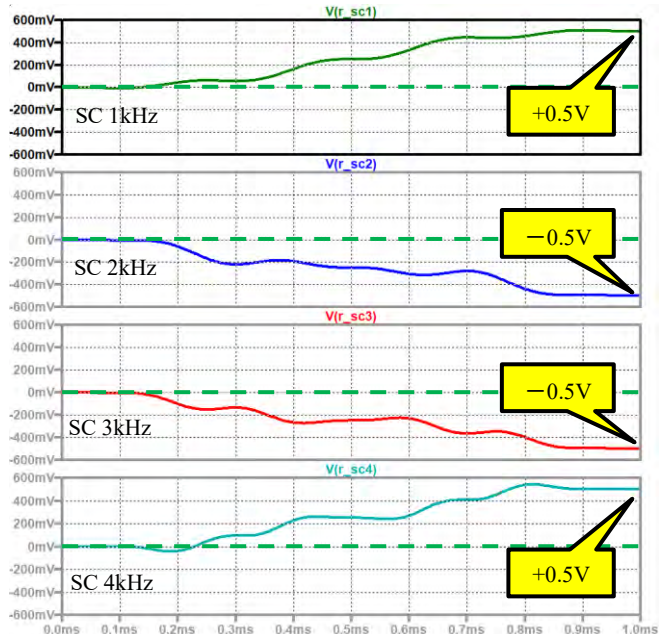


図 14. 図 13 のシミュレーション結果。上からサブ・キャリア (SC) 周波数 1kHz, 2kHz, 3kHz, 4kHz。1 シンボルの最後に値が確定し、送信情報信号 +1V, -1V, -1V, +1V に相当する +0.5V, -0.5V, -0.5V, +0.5V が復調結果として得られている

## アナログ電子回路技術ノート

TNJ-061

## 最後にまたまた CW 通信ネタ。YouTube で…

世界中にモールス・キー・オタクも多いだろうなと思いつつ、YouTube で Vibroplex とサーチしてみました (笑)。なるほど、結構な動画がサーチ結果としてあがってきます。ひとつふたつ見てみました。

たしかにオタクがたくさんいます (笑)。動画のなかで「ではキーを操作してみましょう…。VVV AA3 なんとか」とか打つてますが、CW を聞かなくなりはや 30 数年…。聞き取れないのですよ、これが… (汗)。

A から Z まで打てる (覚えている) のですが、聞き取れないのです… (汗)。

受験のために覚えた和文は、すでにとうの昔に符号も忘れ…ましたが、最盛期には英文平文 120 字近くまで聞き取れた (「1 通」を取りたかったのです…。でも「1 技 1 通」なんてもう死語ですね) ものですが、またあれだけやったので聞き取れなくなることはないと思っても、忘却というのは恐ろしいものです。

人生 100 年時代のフィナーレ (?) には、JESD204B (そのころは 204G だとか…笑) 高速 DAC でも使って 3.5MHz/7MHz の CW 無線機でも自作で製作して (そんな周波数なら現在の DDS 製品で十分ですが…)、また英文だけではなく和文も聞き取り練習をして思い出して、図 1 の Vibroplex パドルを使って CW DX/和文ザンマイのアマチュア無線生活でもしましょうか (笑)。144MHz の和文も楽しいかもしれません。それ以外にも数学の探究もしたいので当分死ぬません (笑)。

そうでなくても「近々、マイコンでデジタル・キーヤを自作してみたいな」とか、単に Vibroplex を動かすだけで (無線通信をやるわけではなく) 悦に入るかなとか思うものでした。「それこそこの時代なら誰か自作用に頒布版キットを作っているだろう」と思ってネットでサーチしてみると、[4], [5] みたいなものも含めて、多数見つけることができます。「これならオレも明日にでも作れるぞ!」と思っても、単に Vibroplex を動かすだけなら「休むに似たり」で、作ること自体が無駄なのかもしれません (笑)。

ところでもう一方の横ブレ・キーの雄であった Bencher は Vibroplex に吸収されていました[6]。時代の流れですね…。

$\overline{VA}$  (とととつーとつー)

いやいや…

$\overline{\text{ラタ}}$  (とととつーと)

## さらに蛇足ですが…

それこそ 30 年近く前の話ですが、電子機器業界のある方がいていたのを覚えています。「会社におじさんがふたりいるんだけど、仕事中に机を叩いて、和文で通信しながら話し合っているんだよね (笑)」。

最後の最後に蛇足ですが (笑)。しかしこれまた美しい…。

## 参考文献

- [1] Vibroplex homepage; <https://www.vibroplex.com/>
- [2] フーリエ級数, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/フーリエ級数>
- [3] フーリエ級数展開の公式と意味, 高校数学の美しい物語, <https://mathtrain.jp/fourierseries>
- [4] Arduino CW Keyer, <https://blog.radioartisan.com/arduino-cw-keyer/>
- [5] Arduino Iambic Keyer and Side Tone Generator,

<https://www.wrbishop.com/ham/arduino-iambic-keyer-and-side-tone-generator/>

[6] Bencher, Inc. has sold, <https://bencher.vibroplex.com/>

[7] 石井 聡; 無線通信とデジタル変復調技術, CQ 出版社