

電波研究の玉手箱

第6講 OFDM は万能選手？

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

毎号、電波技術の基本テーマの中に見え隠れする不思議を玉手箱につめてお届けしている。第6講はワイヤレス通信の切り札：OFDM、その実力は、地上デジタル放送や無線 LAN で実証済み。広帯域信号の伝送に立ちはだかるマルチパス伝搬遅延、それを見事に克服している。でも、万能選手にもアキレス腱はある。それは移動通信に展開した先に見えてくる OFDM と電波伝搬とのせめぎ合いである。



👉 OFDM 登場

20 世紀の終わり、それ（OFDM：直交周波数分割多重）は華々しく登場してきた。当時、移動通信技術の花形であった CDMA から主役の座を奪うように。マルチパス伝搬遅延のばらつきの量が大きくなると広帯域信号の波形歪みをもたらす伝送上の問題を前講で述べた。OFDM はマルチキャリア化によって、その伝搬遅延問題を見事に克服したのである。当時「これで伝搬問題は終わった」と言う声を聞くにつけ、我々電波伝搬研究者には存在意義を問われているようで肩身の狭い思いがあった。でも、本当に終わったのであろうか？そこに切り込んでみたい。

👉 OFDM の仕組み

OFDM の研究開発の歴史は古い。1950 年代、米国の軍事技術として非公開で進められ、何の役立つかも分からないアナログ回路のお化けみたいなものであったらしい [1]。学術上では Chang [2:1966] や Saltzberg [3:1967] の研究論文からスタートし、FFT などのデジタル信号処理技術や IC 化技術に支えられ今日の成熟に至っている。OFDM 技術は本誌の読者に関心が高いであろう地上デジタル放送に採用され解説記事も多かったと思うので、それを繰り返すことはしない。本講では、電波伝搬視点から OFDM 技術のポイントだけを述べる。

帯域幅 W の信号は時間幅 $1/W$ のパルス列波形と等価である。この時間幅はデジタル変調信号のシン

ボル時間長 T_s に相当する。前講で述べたように、遅延のばらつき幅 σ (標準偏差で定義され、遅延スプレッドと呼ばれている) が大きくなって T_s に近づいてくると、時系列で送られてくる前後の符号との干渉 (符号間干渉：ISI) による伝送誤りが発生する。GHz 帯電波に対する市街地の遅延スプレッドは $1\mu\text{s}$ (距離差で 300m に相当) 程度であり、帯域幅 1MHz 以上のデジタル信号伝送ではこの問題が深刻になる。

そこで、OFDM の登場である。全体の帯域を十分に大きな数 K に分割し帯域幅 W/K の狭帯域信号で別々に運んでもらう。分割した一つ一つの搬送波はサブキャリアと呼ばれる。(OFDM は文字通り直交周波数と言う考えでサブキャリア分割を行うのが特徴であるが、これについては OFDM の教科書で学んで欲しい)。そうするとサブキャリア毎のシンボル長 T_e は $T_e = K T_s$ となって K 倍引き伸ばされるので、シンボルの時間ずれが相対的に小さくなって遅延の影響を緩和することができる。

図 1 は、遅延差 $\Delta\tau$ の 2 つの OFDM 信号 (送信源を同じにする先行波と遅延波) の受信と、先行波のタイミングに合わせたシンボル切り出しを説明する図である。シンボル長の引き伸ばしによって誤りの発生を少なくすることができるが、これだけだとまだ不十分なのである。受信機が切り出したシンボル時間の中に隣のシンボル情報が混じるので、澄んだ水が濁った水に変わるイメージである。シンボル時間を長くする (= きれいな水を加えて量を増やす) と濁りは少なくなるが、一旦濁ってしまった水はなかなか気持ちよく澄ん

でこないのである。

そこで、シンボルとシンボルの間に信号を入れない部分をつくれればよいと考えるであろう。この空隙をガードインターバル (GI) と呼ぶ (図 2)。これによって、隣の符号の混入が避けられ、水の濁りが取れるように思う。でも、実はそうではない。

受信側において、図 2 のようにシンボル単位で切り出された信号の中の遅延波は、分割された信号を運んでくれる各サブキャリアの正弦波形 ($t=0$ と $t=T_s$ で連続につながっている；図には 3 周期の成分を例として示している) が整数周期分の途中で打ち切られたものになる。これがほかの周波数成分を生み出し、お互いのサブキャリアの信号を汚しあうことになる。符号間干渉とは別の原因による水の濁りがまだあるのである。この現象は直交性の崩れによるサブキャリア間の干渉 (ICI) になる。

そこで考え出されたものが OFDM 技術の中の傑作、サイクリックプレフィックス (CP) である [4]。送信シンボルの末尾の一部をコピーして先頭につけ、GI 区間をこれで埋めるのである (図 3)。受信側では、図のように T_s 時間分切り出したとすると、その中に含まれる先行波と遅延波の両成分とも A ~ Z の一周期分で構成されていることが分かる。この後、このブロック信号を離散フーリエ変換 (DFT、あるいはそ

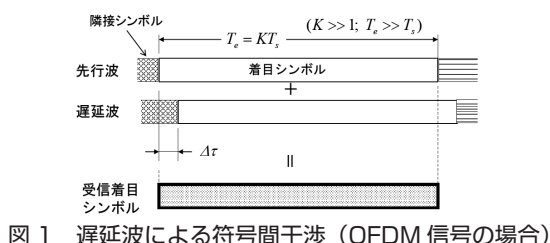


図 1 遅延波による符号間干渉 (OFDM 信号の場合)

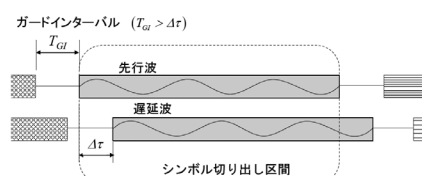


図 2 ガードインターバル ($T_{GI} > \Delta\tau$) を設けた OFDM 信号とそのマルチパス受信 (サブキャリア 3 周期の成分を例として図示；遅延波では周期成分の一部が欠ける → 3 周期以外の周波数にもスペクトルが現れる)

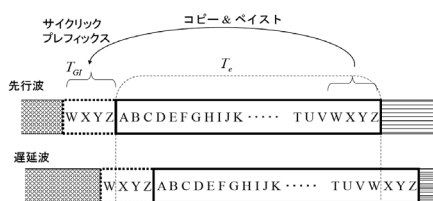
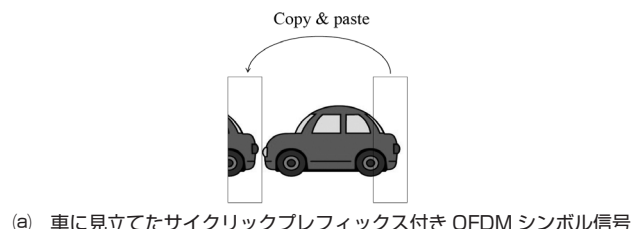


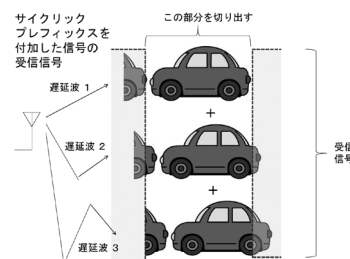
図 3 サイクリックプレフィックスによるガードインターバル

の高速版の FFT) するが、離散フーリエ変換は T_s 時間の波形を前後に無限に加えて周期構造にしたもののフーリエ変換をするのと等価であるので、その信号は、先行波も遅延波も、... A B C ... X Y Z A B C ... X Y Z A B C ... の形で、どちらも同じ周期構造になる。そのため、図 2 で問題となっていた直交性の崩れもなくなり、良好な信号 (まさに澄み切った信号) を受信できる。CP のアイデアがもたらす効果を、大学の授業において学生にぴんと来るように教えるのは結構難しかった。苦心して作った図が図 4 であるがどうか。OFDM の復調で行う離散フーリエ変換は有限区間を切り出した信号が周期的に繰り返されて無限に続く信号のフーリエ変換。図 4 (c) ではどの遅延波も直交性の崩れが無く対等で、故に、他のサブキャリア信号を汚すことはない。

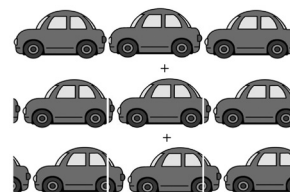
このような仕組みによって遅延差対策ができれば、波形歪みのない信号を受け取ることができる。遅延広がりより長いガードインターバルを設けてそこに CP の仕掛けを組み込めば、サブキャリアの数 K を増やすことによって、伝搬遅延の影響を受けることなくいくらか広帯域な伝送が可能になる。伝搬問題は終わったといわれる所以である。



(a) 車に見立てたサイクリックプレフィックス付き OFDM シンボル信号



(b) 到着時間の異なる 3 台の車 (サイクリックプレフィックスつき) と先頭車に合わせた車一台分 (T_s) での切り出し



(c) 無限に並ぶ同じ車の列 (位置はずれているが FFT ではどの車列も同じ周波数成分に分けられ、サブキャリア周波数間の干渉がない)

図 4 サイクリックプレフィックス効果 (=直交性を失わない効果) の直感的な説明

電波伝搬との戦い

OFDM で良好な情報伝送を行うためには、システムパラメータ（有効シンボル長 T_e 、ガードインターバル T_{GI} ）と伝搬パラメータ（遅延スプレッド σ_τ 、最大ドップラー周波数 f_D ）とで、以下の関係を満たさなければならない。

- ① T_{GI} は、 σ_τ に対して十分大きい（遅延の広がりを受取るため：ISI 条件）
- ② T_e は T_{GI} にくらべて十分大きい（伝送効率をよくするため：効率条件）
- ③ T_e は $1/f_D$ （ $\equiv T_f$ ）に比べて十分小さい（シンボル内およびシンボル間の位相の時間変化を抑えるため：位相変動条件）

この関係は次式（単位：秒）で表される。

$$\sigma_\tau \ll T_{GI} \ll T_e \ll 1/f_D \quad (1)$$

└ ISI 条件 ─┘ └ 効率条件 ─┘ └ 位相変動条件 ─┘

図5はこの関係をまとめている。OFDM の有効シンボル長 T_e は、全帯域幅 W 、サブキャリア数 K を用いて、 $T_e = K/W$ と表される。これを式(1)に代入すると、次式のように整理される（ T_{GI} の項は省略）。

$$W\sigma_\tau \ll K \ll W/f_D \quad (2)$$

この式から、伝搬環境に関する条件

$$\alpha \equiv f_D \sigma_\tau \ll 1 \quad (3)$$

が満たされれば、サブキャリア数 K を増やすことによっていくらでも帯域幅 W を大きくすることが可能になり、OFDM が広帯域伝送にきわめて優れた伝送方式であることがわかる。新たな伝搬パラメータ α はスプレッドファクタと呼ばれる。では OFDM は電波伝搬問題を克服したのであろうか。答えは NO である。 $f_D \sigma_\tau \ll 1$ の条件そのものは超えられないためである。

屋内で運用される無線 LAN の場合は f_D も σ_τ も小さいので設計上あまり問題ないが、移動通信環境（例えば、5GHz 帯での高速移動体通信）を想定すると、性格の異なる二つの電波伝搬現象（符号間干渉を生み出す遅延の広がり、シンボル内およびシンボル間の位相変動をもたらすドップラースペクトルの広がり）の挟み撃ちにあって、式(1)の条件を満たす設計が難しくなってしまう。例えば、屋外での運用として $\sigma_\tau = 2\mu\text{s}$ とすると、 $T_{GI} \geq 10\mu\text{s}$ としたい。周波数 5GHz、時速 100km/h では最大ドップラー周波数 f_D はおよそ 500Hz、すなわち $T_f = 2\text{ms}$ となるので、その 1/100 以下である $T_e \leq 20\mu\text{s}$ としたい。そうすると、 $T_{GI} \ll T_e$ の効率条件が満たされなくなっていることに気づくであろう。そのため、伝送特性に影響が出ない範囲で、ガードインターバルの長さをできるだけ短くしたいという要求が出てくる。このことが、不十分なガードインターバル問題を引き起こし [5]、それに付随するいろいろな対策が求められる。

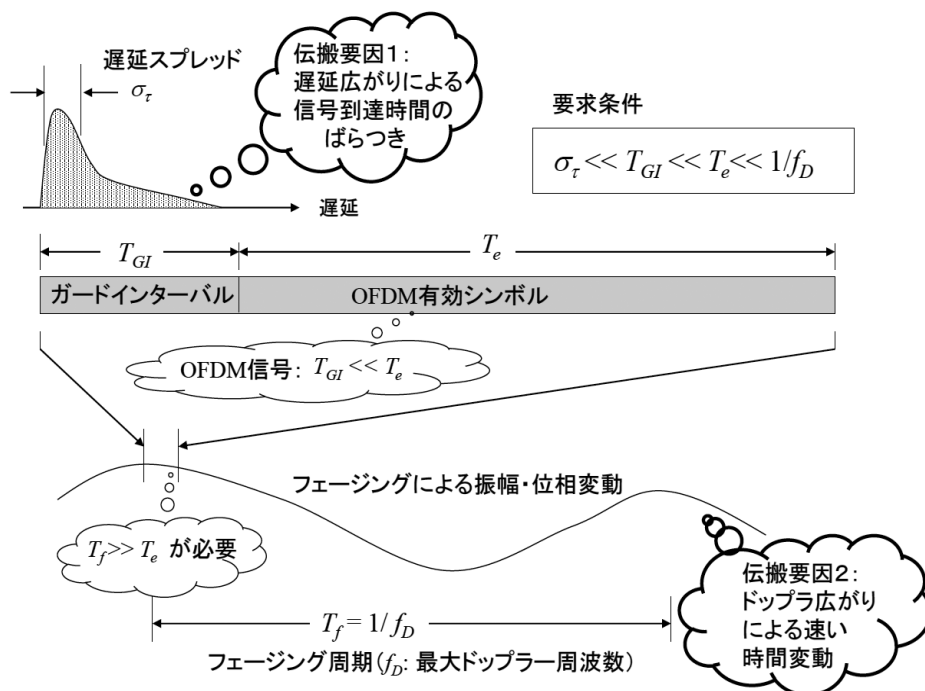


図5 OFDM の伝搬劣化要因：遅延広がりとドップラー周波数広がり

通信サービスと伝搬環境

OFDM がうまく働くには(1)式の条件が必要条件になる。これが満たされれば、(2)式により信号設計が可能であり、帯域幅と共にサブキャリアの数 K を増やして行けばよい。それを可能とする伝搬条件が(3)式である。ここでは、スプレッドファクタの値に応じて3つの領域を定義する。

【領域 A】 スプレッドファクタが十分小さく、信号設計が問題なく行える領域

【領域 B】 スプレッドファクタがある程度大きく、良好な通信を行うためには信号設計に工夫（や対策）が求められる領域

【領域 C】 スプレッドファクタが1に近づき、いかなる工夫をしても良好な通信ができない領域

領域 A は伝搬問題が無いと言うのではない。非常に遅延広がり大きい環境はあるがドップラー広がり小さい、あるいはその逆と言ったように、一方の特性だけが顕著であっても、両者の積、スプレッドファクタが小さければよいのである。要するに、広帯域信号をシングルキャリアの伝送では無理であっても、OFDM にすれば問題ないという領域である。領域 B は信号の最適設計を行えば、良好な通信を実現できる領域である。領域 C は、もはや手の施しようが無く、無線情報伝送の物理限界を超えている環境である。

定量的な意味で、その境界線をどこに引くかは難しい。目安として、A と B の境を $\alpha=0.0001$ 、B と C の境を $\alpha=0.01$ としよう。図 6 は、伝搬パラメータである遅延スプレッドおよび最大ドップラー周波数と二つの境界線の関係を示している。また、その図の上に、OFDM が活躍している4つの無線システムがある位置を①～④で示している。この位置はおおよそのもので、それぞれの運用環境の中では厳しめの位置にプロットしている。

- ① 地上デジタル放送 ($f=500\text{Hz}$, $v=100\text{km/h}$)
- ② 屋内無線 LAN ($f=5\text{GHz}$, $v=4\text{km/h}$)
- ③ 屋外移動通信 ($f=5\text{GHz}$, $v=100\text{km/h}$)
- ④ 屋外移動通信 ($f=30\text{GHz}$, $v=100\text{km/h}$)

同図から、遅延広がりもドップラー広がりも大きい屋外移動通信（③、④）が B の領域に入っているが、最適な信号設計と可能な対策を行えば、まだ、問題が解決できる領域である。無線通信は、より高い周波数の利用、より高速に移動する端末へと向いており、次世代無線システムについては領域 C を意識した対応が求められて来よう。

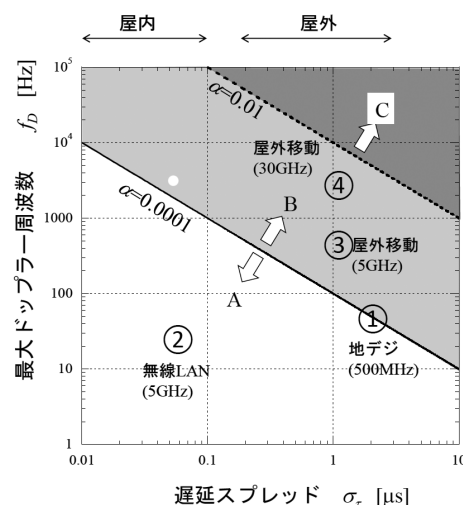


図 6 伝搬環境と通信サービス（①～④の位置は目安）

おわりに

OFDM には、電波伝搬問題に対して強い耐性があること、それでもまだ万能選手にはなりえておらず弱点もあることを述べた。商用システムとして OFDM が最初に導入された地上デジタル放送では電波の周波数が低いため、また、無線 LAN では端末に速い動きが無い、スプレッドファクタ問題が顕在化することはなかった。一方、より高い周波数帯電波が用いられ、かつ、高速移動体をサービス対象とする移動通信では、遅延とドップラーの広がり共に大きくなるため、本講で述べた伝搬問題を考慮した信号設計が求められる。この延長線上に、どのように工夫してもこれ以上のことはできないと言う情報伝送の物理限界問題がある（図 6 の領域 C）。これについては次講で取り上げたい。

OFDM は新時代の無線通信の救世主として大活躍しているが、本文で述べたようにその種は半世紀以上も前に蒔かれたものである。社会のニーズの未成熟、デバイス・回路部品技術の未発達など、いろいろの事情があるにせよ、基盤技術が開花するまでにはとてつもなく長い下積みの時間があることを物語っている。インターネット然り、MIMO 然りである。

<参考文献>

- [1] J. J. van de Beek, P. O. Borjesson, P. Odling, and S. K. Wilson, "Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)," Rev. Radio Sci. 1996-1999, Oxford Univ. Press, pp. 177-206, 1999.
- [2] R. W. Chang, "Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission," Bell Syst. Tech. Jour., vol. 45, pp. 1775-1796, 1966.
- [3] B. R. Saltzberg, "Performance of an efficient parallel data transmission system," IEEE Trans. Commun., vol. 15, no. 6, pp. 805-811, 1967.
- [4] A. Peled and A. Ruiz, "Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms," Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Proc. (ICASSP '80), pp. 964-967, 1980.
- [5] 唐沢好男, 改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2016.03.