

マルチパス環境下における周波数オフセットの影響を受けた OFDM 信号の復調性能の改善

1235068 野田 正太郎 【ワイヤレスネットワーク研究室】

Improved Demodulation Performance of OFDM Signals in the Presence of Frequency Offset in Multipath Fading Environment

1235068 Shotaro Noda 【Wireless Communications & Networking Lab.】

1 はじめに

直交周波数分割多重 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 方式は、直交する多数のサブキャリアをデジタル変調して通信の高速化と周波数利用の効率化を実現する [1]。しかし、OFDM 方式では、周波数オフセットの影響を受けてキャリア間干渉 (intercarrier interference: ICI) が発生するとビット誤り率 (bit-error rate: BER) が増加する [2]。OFDM 方式において ICI を低減させる代表的な方法として、周波数オフセットを推定して補償する方式、時間領域で窓関数を適用する方式、ICI を低減する符号化を行う方式などが挙げられる [3]。OFDM 方式では伝送路推定のために、パイロットシンボルと呼ばれる既知のシンボルを送信し、悪条件下においても信頼性の高い通信環境を確保することがよく行われる [1]。本研究では、全てのメッセージシンボルを 1 にそろえたパイロットシンボルを送信し、これにより得られる性質を用いて受信機で周波数オフセットを推定して補償する方式を提案する。これにより、マルチパス環境下における周波数オフセットの影響を補償し、復調性能を改善できることを明らかにする。

2 パイロットシンボルを適用した OFDM

2.1 送信機

OFDM 方式のサブキャリア数を M とする。時刻 $t = nT_s$ において m 番サブキャリアによって伝送される差動符号化されたメッセージシンボルを $d_{m,n}$ とする。時刻 $t = cT_s$ ($c = 1, 2, \dots, C$) において m 番サブキャリアによって伝送される既知のパイロットシンボルを $p_{m,c}$ とする。したがって、送信されるメッセージシンボル $d_{m,n}^p$ は次のようになる。

$$d_{m,n}^p = \begin{cases} p_{m,c}, & n = c \\ d_{m,n}, & n \neq c \end{cases} \quad (1)$$

本研究では、全ての m, c において $p_{m,c} = 1$ とし、図 1 に示した時間・周波数配置でパイロットシンボルを送信する。

パイロットシンボルを付加した OFDM 方式の送信信号 $s(t)$ は次式で与えられる。

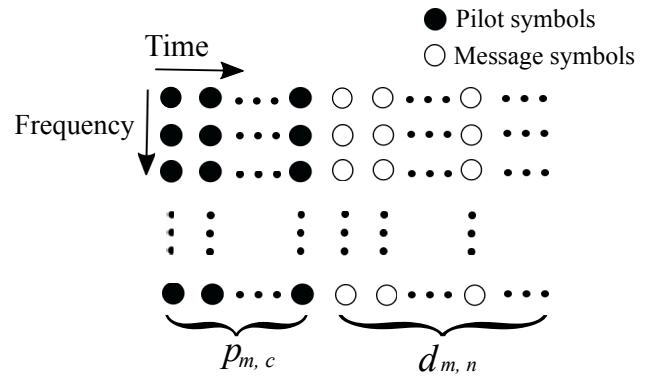


図 1 パイロットシンボル $p_{m,c}$ とメッセージシンボル $d_{m,n}$

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t - nT_s) \sum_{m=0}^{M-1} d_{m,n}^p e^{j2\pi \frac{m}{M} (t - nT_s)} \quad (2)$$

ここで、 $\frac{1}{T}$ はサブキャリアの周波数間隔、 T_s は $T_s = T + T_g$ 、 T_g はガードインターバルである。また、ゲート関数 $g(t)$ を次式で与える。

$$g(t) = \begin{cases} 1, & -T_g < t < T_g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 受信機

時刻 $t = n'T$ において得られる OFDM 方式の受信信号の M 個のサンプル値列 $r_{k,n'}$ は次式で与えられる。

$$r_{k,n'} = e^{j(2\pi\Delta f(k\frac{T}{M} + n'T_s) + \theta)} \times \sum_{l=0}^{L-1} h_l s\left(k\frac{T}{M} + n'T_s - \tau_l\right) + w_{k,n'} \quad (4)$$

ここで、 k ($k = 0, 1, \dots, M-1$) はサンプル番号、 L はパス数、 l はパス番号、 h_l は l 番パスの複素振幅ゲイン、 τ_l は l 番パスの遅延サンプル数、 Δf は周波数オフセット、 θ は到来初期位相、 $w_{k,n'}$ は加法性ガウス雑音である。受信機において式 (4) に FFT を行うことで受信シンボルを得ることができる。

時刻 $t = c'T$ において m' 番サブキャリアによって伝送されたパイロットシンボル部分の受信シンボル $\hat{R}_{m',c'}$ は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 \hat{R}_{m',c'} &= \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} h_l e^{\frac{j2\pi\Delta f T k}{M}} e^{j2\pi\Delta f T_s c'} e^{j\theta} \\
 &\times \sum_{m=0}^{M-1} p_{m',c'} e^{\frac{j2\pi m k}{M}} e^{\frac{-j2\pi m l \tau_l}{M}} e^{\frac{-j2\pi m' k}{M}} + W_{m',c'} \\
 &= \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} h_l e^{j2\pi\Delta f T_s c'} e^{\frac{j2\pi\Delta f T k}{M}} e^{j\theta} e^{\frac{-j2\pi m' k}{M}} \\
 &\times \frac{\sin(\pi(k - \tau_l))}{\sin\left(\frac{\pi(k - \tau_l)}{M}\right)} e^{j\pi(1 - \frac{1}{M})(k - \tau_l)} + W_{m',c'} \quad (5)
 \end{aligned}$$

ここで、 $W_{m',c'}$ は雑音成分である。

上式において、

$$\frac{\sin(\pi(k - \tau_l))}{\sin\left(\frac{\pi(k - \tau_l)}{M}\right)} e^{j\pi(1 - \frac{1}{M})(k - \tau_l)} = \begin{cases} 1, & k = \tau_l \\ 0, & k \neq \tau_l \end{cases} \quad (6)$$

であることに着目すると、式(5)は次のように変形できる。

$$\begin{aligned}
 \hat{R}_{m',c'} &= e^{j\theta} e^{j2\pi\Delta f T_s c'} \\
 &\times \sum_{l=0}^{L-1} h_l e^{\frac{j2\pi\Delta f T \tau_l}{M}} e^{\frac{-j2\pi m' \tau_l}{M}} + W_{m',c'} \quad (7)
 \end{aligned}$$

式(7)を用いると、 m' 番サブキャリアによって伝送されたパイロットシンボルから得られる時刻 $t = c'T_s$ における周波数オフセットの推定値 $\Delta f'_{m',c'}$ が次のように得られる。

$$\frac{\hat{R}_{m',c'}}{\hat{R}_{m',c'-1}} = e^{j2\pi\Delta f'_{m',c'} T_s} \quad (8)$$

また、全ての m', c' について同様の処理を行い、それらの平均値を求めることで、より正確な周波数オフセットの推定値 $\Delta f'$ を求め、 $\Delta f'$ を用いて受信機で次のように周波数オフセットを補償する。

$$r'(t) = r(t) e^{-j2\pi\Delta f' t} \quad (9)$$

$r'(t)$ のサンプル値列に対して FFT と差動復号を行うことにより、マルチパス環境下において周波数オフセットの影響を受けたメッセージシンボルを復調する。

3 性能評価

3.1 条件

サブキャリア数を $M = 64$ 、ブロック伝送の OFDM シンボル数を 1000、変調方式を DQPSK、パス数を $L = 8$ 、マルチパスの相対電力減衰を -1dB 、ガードインターバル長を $T_g = \frac{T}{8}$ 、 l 番パスの遅延サンプル数を $\tau_l = \frac{l}{64}T$ 、正規化周波数オフセットを $\Delta f T = 0.066$ として、OFDM 方式の BER 特性を求めると。

3.2 ICI 自己キャンセル方式

本研究では、文献[3]で提案されている ICI を低減する符号化を行う ICI 自己キャンセル (ICI self-cancellation) 方式を適用した OFDM 方式と提案方式の BER 特性を比

較する。ICI 自己キャンセル方式を適用した OFDM 方式の送信信号は次式で与えられる。

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t - nT_s) \sum_{m=0}^{M-1} X_{m,n} e^{j2\pi\frac{m}{M}(t - nT_s)} \quad (10)$$

ここで、 $X_{m,n}$ は ICI 自己キャンセル変調されたメッセージシンボルであり、 $X_{1,n} = -X_{0,n}$, $X_{3,n} = -X_{2,n}$, ..., $X_{M-1,n} = -X_{M-2,n}$ である。この方式は通常の OFDM 信号の 2 倍のメッセージシンボルを必要とするため、伝送速度が $\frac{1}{2}$ になるという問題がある。

3.3 結果

マルチパス環境下における周波数オフセットを考慮した従来の OFDM 方式、ICI 自己キャンセル方式を適用した OFDM 方式、パイロットシンボルの送信回数が $C = 2$ の提案 OFDM 方式の BER 特性を図 2 に示す。この図から提案方式により、ICI が十分に低減され、復調性能を改善できることが分かる。

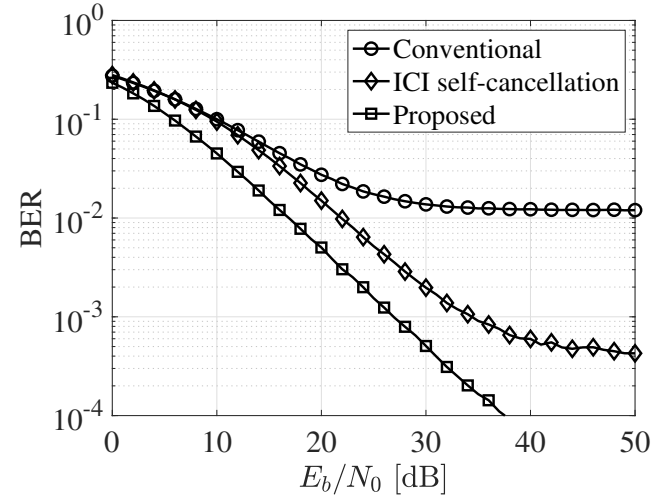


図 2 ICI 自己キャンセル方式と提案方式における BER 特性の比較

4 まとめ

本研究では、マルチパス環境下における周波数オフセットの影響を受けた OFDM 方式の復調性能の改善を目的として、ICI 自己キャンセル方式を適用した OFDM 方式とパイロットシンボルを利用した OFDM 方式の BER 特性の比較を行った。その結果、パイロットシンボルを 2 回送信する方式で十分に ICI を低減でき、伝送速度をほとんど低下させずに復調性能を改善できることが分かった。

参考文献

- [1] 伊丹 誠, わかりやすい OFDM 技術, オーム社, 2005.
- [2] P. Tan and N.C. Beaulieu, "Reduced ICI in OFDM systems using the "better than" raised-cosine pulse," IEEE Communications Letters, vol.8, issue 3, pp.135-137, March 2004.
- [3] Y. Zhao and S.G. Hggman, "Intercarrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems," IEEE Trans. Commun., vol.49, pp.1185-1191, July 2001.