

非整数倍の遅延時間を有するチャンネルにおける SC および OFDM 伝送の特性比較

Performance Comparison of Single-Carrier and OFDM Transmissions in a Channel Having Fractionally Spaced Time Delays

留場 宏道 武田 和晃 安達 文幸
 Hiromichi TOMEBA Kazuaki TAKEDA Fumiyuki ADACHI
 東北大学大学院工学研究科 電気・通信工学専攻

1. まえがき

周波数選択性フェージングチャンネルにおける伝送方式として OFDM 伝送[1]とともに、周波数領域等化を用いるシングルキャリア(SC)伝送[2]が注目を集めている。本論文では SC および OFDM 伝送を対象に、受信側 FFT サンプリング周期で正規化された伝搬路パスの正規化遅延時間が非整数倍である場合に、遅延時間領域窓関数法を用いたチャンネル推定が伝送特性に与える影響を計算機シミュレーションによって明らかにしている。

2. 受信信号表現

SC および OFDM 受信信号は次式で与えられる。

$$r(t) = \begin{cases} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \tilde{\xi}_l s(t-l) + \psi(t) + \eta(t), & \text{SC} \\ \sum_{l=0}^{L-1} \xi_l s(t-\tau_l) + \eta(t), & \text{OFDM} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{\xi}_l = \sum_{l'=0}^{L-1} \xi_{l'} h(l-l')$ であり、 L は伝搬路のパス数、 $\{h(t)\}$ は送受信フィルタのインパルス応答を表す。 ξ_l , τ_l , $\{s(t)\}$ および $\{\eta(t)\}$ は第 l パスの複素パス利得、遅延時間、送信信号および雑音成分をそれぞれ表す。SC 伝送の受信信号に現れる $\psi(t)$ は送受信フィルタによって発生する符号間干渉成分である。一方、OFDM 伝送ではガードインターバル(GI)長が十分に長ければ符号間干渉は発生しない。

3. 遅延時間領域窓関数法を用いるチャンネル推定

周波数領域等化を行うためには高精度なチャンネル推定が必要となる。周期的に送信される既知パイロット系列を用いて受信側で逆変調を行うことによりチャンネル推定値 $\{\hat{H}(k); k=0 \sim (N_c-1)\}$ を得ることが出来る。ここで、 N_c は FFT ブロックサイズである。また、伝搬路自身のチャンネルインパルス応答は GI 内にしか存在しないことに着目し、 $\hat{H}(k)$ を IFFT することによりチャンネルインパルス応答 $h(\tau)$ を求め、遅延時間領域にて窓関数を乗算することにより雑音を低減できる[3]。 $\hat{H}(k)$ を IFFT することにより得られる瞬時のチャンネルインパルス応答は次式で与えられる(簡単のため、干渉および雑音項は省略する)。

$$\tilde{h}(\tau) = \begin{cases} \sum_{l=0}^{L-1} \xi_l h(\tau-\tau_l), & \text{SC} \\ \sum_{l=0}^{L-1} \xi_l \varphi(\tau-\tau_l), & \text{OFDM} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\varphi(\tau) = \exp(-j\pi\tau(N_c-1)/N_c) \text{sinc}(\pi\tau)/\text{sinc}(\pi\tau/N_c)$ である。正規化遅延時間が整数倍であるとき、 $h(\tau)$ は伝搬路のチャンネルインパルス応答に一致するが、正規化遅延時間が非整数倍であるとき、 $h(\tau)$ は伝搬路のチャンネルインパルス応答よりも広がってしまう。 $|h(\tau)|$ および $|\varphi(\tau)|$ を図 1 に示す。なお、SC 伝送の送受信フィルタとしてロールファクタ $\alpha=0.22$ のナイキストフィルタ[4]を用いた。図 1 より、 $h(\tau)$ は $\tau=0$ 付近に集中しているが、 $\varphi(\tau)$ は遅延時間領域全体に広がっていることが分かる。このことは OFDM 伝送では窓関数 $W(\tau)$

を用いて雑音を低減しようとする、雑音だけではなく伝搬路のインパルス応答も打ち切ってしまうことを示唆している。一方、SC 伝送では、窓幅を適切に設定すれば正規化遅延時間が整数倍であるときと同様に雑音低減が可能である。本論文では窓関数を $\tau = -4 - N_g + 3$ (その他) のとき $W(\tau)=1(0)$ とした。

4. 計算機シミュレーション

FFT サイズを $N_c=256$, GI 長を $N_g=32$ とした。チャンネルモデルは 16 パスの一様電力遅延プロファイルを有する周波数選択性ブロックレイリーフェージングチャンネルとした。パスの遅延時間は $\tau = l\Delta_l$ とし、 Δ_l は $[-1/2, 1/2]$ の範囲に一様分布するものとした。逆変調に用いる参照信号として SC では MMSE 規範, OFDM では ZF 規範を用いた[5]。図 2 にチャンネル利得推定値と真のチャンネル利得値との正規化平均二乗誤差(NMSE)を示す。SC 伝送では、OFDM に比べてチャンネル推定精度が劣化しているものの正規化遅延時間が非整数倍である場合と整数倍のときとで NMSE に大きな差は見られない。一方 OFDM では、正規化遅延時間が非整数倍のとき、整数倍のときよりも大幅に NMSE が劣化してしまう。これは遅延時間領域窓関数により雑音だけではなく伝搬路のインパルス応答も打ち切ってしまったためである。平均ビット誤り率(BER)特性を図 3 に示す。パイロットブロックは 16FFT ブロック毎に送信されるものとし、比較のために正規化遅延時間が整数倍のときの理想チャンネル推定の特性も併せて示した。SC 伝送では、正規化遅延時間によらずほぼ同じ BER 特性が得られ、理想チャンネル推定からの劣化は約 3dB である。一方 OFDM では、正規化遅延時間が整数倍の場合には理想チャンネル推定からの劣化は約 1dB 程度であるが、正規化遅延時間が非整数倍の場合、チャンネル推定精度が大幅に劣化してしまうため、BER 特性は大きく劣化してしまうことが分かる。

5. むすび

本論文では非整数倍の正規化遅延時間を有するパスが存在するチャンネル環境下における SC および OFDM 伝送を対象に、遅延時間領域窓関数法を用いるチャンネル推定法を用いたときの伝送特性を計算機シミュレーションによって明らかにし、OFDM 伝送では窓関数により雑音だけではなく伝搬路のインパルス応答も打ち切ってしまうチャンネル推定精度が大幅に劣化してしまうが、SC 伝送では、正規化遅延時間が非整数倍であってもチャンネル推定精度の劣化はほとんどないことを明らかにした。

参考文献

- [1] S. Hara and R. Prasad, Vol. 35, No. 12, pp. 126-133, Dec. 1997.
- [2] D. Falconer, et al., IEEE Commun. Mag., Vol. 40, pp. 58-66, Apr. 2002.
- [3] J.-J. van de Beek, et al., Proc. 45th IEEE VTC'95, pp.815-819, Chicago, IL, July 1995.
- [4] J.G. Proakis, Digital communications, 2nd ed., McGraw-Hill, 1995.
- [5] K. Takeda and F. Adachi, Proc. IEEE VTS APWCS, Hokkaido University, Japan, 4-5 Aug. 2005.

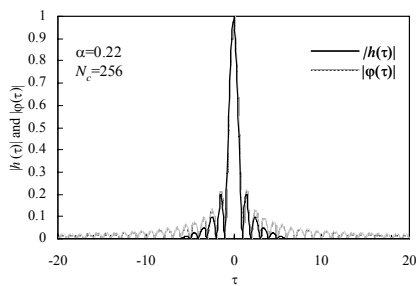


図 1 $|h(\tau)|$ と $|\varphi(\tau)|$

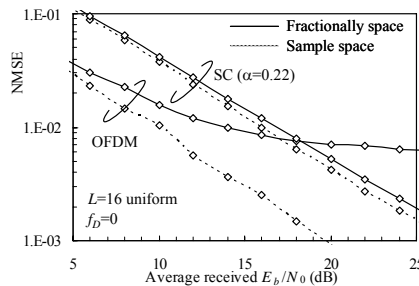


図 2 NMSE 対 E_b/N_0 特性

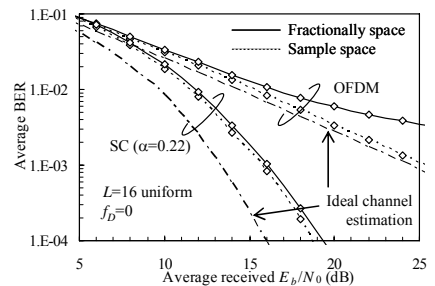


図 3 平均 BER 対 E_b/N_0 特性