

# アナログシングルキャリア周波数領域等化(SC-FDE)を用いた 画像伝送に関する一検討

船木 洋晃<sup>†</sup> アムナート ブンカジャイ<sup>‡</sup> 安達 文幸<sup>†</sup> 阿部 正英<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東北大学大学院 工学研究科 電子工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市荒巻字青葉 6-6-05

<sup>‡</sup>東北大学 電気通信研究機構 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1

E-mail: <sup>†</sup>{funaki,masahide}@mk.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup>amnart@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 移動無線通信における高速・高品質な画像伝送および動画伝送を実現するためには広い周波数帯域幅を必要とする。限られた無線帯域幅を用いて画像伝送および動画伝送を実現するため、従来のデジタル信号伝送では高能率の画像圧縮を用いることでデータ量の削減を行っている。しかしながら、圧縮及び解凍処理による遅延といった問題がある。周波数領域等化を用いるシングルキャリア伝送(SC-FDE)をアナログ信号伝送に応用したアナログ SC-FDE はこの問題を解決できる。アナログ SC-FDE はアナログ信号を利用するため、周波数利用効率の高い伝送を実現できる。また、アナログ信号の周波数成分を広帯域にマッピングし、FDE を適用することにより周波数ダイバーシチ効果を獲得できる。アナログ SC-FDE に関するこれまでの検討では、正弦波及び音声の伝送特性測定や、元の音声と受信音声の波形観測を行っていた。しかしながら、画像伝送への適用はまだ明らかにされていない。特に、画像伝送において、スペクトルの特定の成分にピークを持つような送信信号ブロック及びその信号が無線伝搬路に与える影響についてはまだ検討されていない。

本稿は、画像伝送にアナログ SC-FDE を適用し、正規化平均二乗誤差(NMSE)とピーク信号対雑音電力比(PSNR)を計算機シミュレーションにより求め、伝送特性と画像の品質を評価する。NMSE 特性より、アナログ SC-FDE を適用することで従来のアナログ信号伝送に比べ NMSE 特性が改善されることを示した。また、信号波形が伝送特性に与える影響について明らかにし、スペクトルの特定の成分にピークを持つような信号波形を送信する場合に発生する伝送特性の劣化をランダムインターリーブングすることで抑圧できることを示している。

**キーワード** アナログ波形伝送, 周波数領域等化, シングルキャリア伝送, Analog SC-FDE, 画像伝送

## Image Transmission using Analog Single-Carrier with Frequency-Domain Equalization

Yoko FUNAKI<sup>†</sup> Amnart BOONKAJAY<sup>‡</sup> Fumiyuki ADACHI<sup>†</sup> and Masahide ABE<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan

<sup>‡</sup>Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{funaki,masahide}@mk.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup>amnart@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** High-speed and high-quality image transmission in mobile communications requires very large transmission bandwidth. In digital signal transmission, high-efficient image compression technique is commonly used for reducing the amount of transmit data; however, its processing delay is the main drawback. To achieve a spectrum-efficient high-quality image transmission, analog single-carrier transmission with frequency-domain equalization (analog SC-FDE) is a promising technique since it achieves good transmission quality by employing broadband frequency mapping and one-tap FDE. To date, Analog SC-FDE was extensively studied considering cosine wave and voice transmission, but image transmission was not considered yet. It should be noted that there is a unique property of image signal containing spectrum peak, which causes a severe performance degradation when image signal is transmitted through a frequency-selective fading channel.

In this paper, we extend the analog SC-FDE to image transmission and evaluate the transmission quality in terms of normalized mean-square error (NMSE) and peak signal-to-noise power ratio (PSNR). The effect of signal containing spectrum peak in image transmission using analog SC-FDE is discussed. We also show that a simple random interleaver can be used for suppressing the problem occurred by the signals containing spectrum peak.

**Keywords** Analog Waveform Transmission, Frequency-domain Equalization, Single-carrier Transmission, Analog SC-FDE, Image Transmission

### 1. まえがき

最近、携帯端末は電話機能だけでなく様々な形態の通信を扱うマルチメディア情報通信端末として利用されている。このマルチメディア化に伴い通信容量は急速に増加しており、その中でも、Youtube などの動画共有サービスを利用した動画再生に必要とする通信容量は全通信容量の約半分を占めている[1]。移動無線通信において使用できる伝送帯域幅には限りがあるため、従来のデジタル信号伝送ではさらなる大容量化を実現するため画像圧縮によりデータ量を削減している[2]。一方、アナログ信号伝送はデジタル信号伝送に比べ狭い帯域幅で伝送できる。しかし、伝搬路が周波数非選択性フェージングであるため、受信信号電力が大きく低下してしまう場合がある。これを克服する技術として周波数領域等化を用いるシングルキャリア(SC-FDE)をアナログ信号伝送に適用したアナログ SC-FDE [3]がある。アナログ SC-FDE はアナログ信号の周波数成分を広帯域にマッピングし、FDE を適用することにより周波数ダイバーシチ効果を獲得することで伝送特性を改善できる。

デジタル信号伝送を用いた画像伝送は圧縮および解凍処理による遅延といった問題がある。しかし、アナログ SC-FDE を用いた画像伝送は圧縮を必要としないため遅延の少ない伝送が可能であり、かつ、高い伝送特性を実現できる。

アナログ SC-FDE に関するこれまでの検討では従来のアナログ信号伝送との比較を行い伝送特性が大幅に改善することを明らかにしている[3]。また、単側波帯(SSB)アナログ伝送への適用し、両側波帯(DSB)伝送に近い伝送特性を維持しながら周波数利用効率を2倍に向上できること[4]やサブキャリア合成・アンテナダイバーシチを適用することで更に伝送特性が改善すること[5]を明らかにしている。これらの検討は音声伝送をもに行われている。音声は複数の周波数成分の線形和であるため信号波形は複雑な形となり、その周波数スペクトルに偏りが無い。一方、画像には空や海などの輝度値や色が異なる領域や縞模様のように異なる色を用いて複数の平行あるいは交差するような領域が存在する。これらの領域における信号波形のスペクトルは特定の成分にピークを持つため、画像伝送においてフェージング影響によりスペクトルが歪んでしまうと信号を正しく復元することができなくなる。

そこで本稿では、アナログ SC-FDE を画像伝送へ適用し、伝送特性と画質評価についての検討を行う。また、画像の信号波形が伝送特性及び画質に与える影響について考察する。計算機シミュレーションにより、画像伝送にアナログ SC-FDE を適用した場合に従来のアナログ信号伝送に比べ優れた NMSE 特性が得られること示す。また、スペクトルの特定の成分にピークを持つ信号波形を伝送する場合に発生する伝送特性の劣化をランダムインターリーブングすることで抑圧できることを明らかにしている。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章において、画像伝送におけるアナログ SC-FDE の概要を述べ、第3章にてアナログ SC-FDE を画像伝送に適用した場合の計算機シミュレーション結果を述べる。第4章にてまとめる。

### 2. Analog SC-FDE を用いた画像伝送

#### 2.1. Analog SC-FDE の信号伝送系

本章では、アナログ SC-FDE の画像伝送システムモデルについて述べる。図1にシステムモデルを示す。

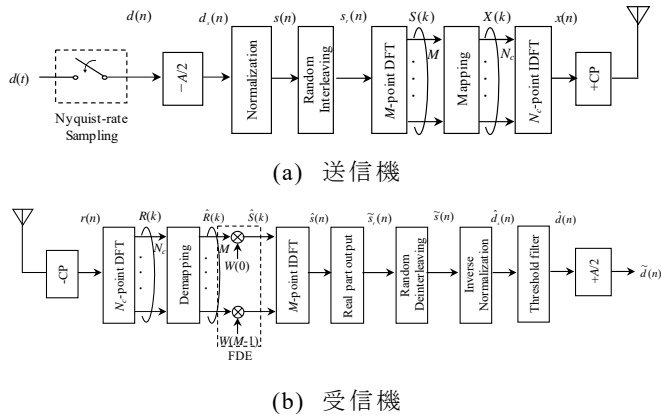


図1 システムモデル

送信機側ではアナログ画像信号  $d(t)$  をサンプリングし、サンプル値信号  $d(n)$  を得る。サンプル値信号  $d(n)$  がとりうる最大の振幅値を  $A$  とすると  $d(n)$  は  $\{0 \sim A\}$  の値をとる。  $d(n)$  から  $A/2$  を減算し  $d_s(n)$  を得る。

$$d_s(n) = d(n) - A/2 \tag{1}$$

また、平均送信電力が 1 となるよう正規化し、  $s(n)$  を得る。

$$s(n) = \frac{d_s(n)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |d_s(n)|^2}}, \quad n = 0 \sim N-1 \tag{2}$$

ここで、  $N$  は総サンプル数を表す。  $s(n)$  をランダムインターリーブングし、データ系列  $s_r(n)$  を得る。

$$s_r(n) = s(i(n)), \quad n = 0 \sim N-1 \tag{3}$$

ただし、  $i(n)$  は  $0 \sim N-1$  の整数値をランダムに入れ替えて得られる行列である。

サンプル値信号  $s_r(n)$  から  $M$  サンプルを逐次的に抽出して  $M$ -point DFT により周波数領域信号  $\{S(k); k = 0 \sim M-1\}$  に変換する。

$$S(k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} s_r(n) \exp(-j2\pi \frac{n}{M} k), \quad k = 0 \sim M-1 \tag{4}$$

$M$ -point DFT で得られた  $M$  サブキャリアを  $N_c$  サブキャリアの広帯域にマッピングし  $\{X(k); k = 0 \sim N_c-1\}$  を得る。マッピング法は先行研究[3]より、周波数ダイバーシチ効果が得られる分散配置法を用いる。

$$\begin{cases} X(k) = S(k'), & k' = k \times N_c / M \\ X(k) = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

$X(k')$  を  $N_c$ -point IDFT により、時間領域信号  $x(n)$  に変換する。

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N_c}} \sum_{k=0}^{N_c-1} X(k) \exp\left(j2\pi \frac{k}{N_c} n\right) \quad (6)$$

$x(n)$  にサイクリックプレフィックス(CP)を付与した信号  $\{\tilde{x}(n); n=0 \sim N_c + N_g - 1\}$  を送信する。

伝搬チャネルを準静的  $L$  パスチャネルであると仮定するとチャネルのインパルス応答  $h(\tau)$  は次式で表される。ただし、 $L$  は伝搬チャネルのパス数を、 $\tau_l$  は第  $l$  番目のパスの遅延時間を示す。

$$h(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \delta(\tau - \tau_l) \quad (7-a)$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} E[h_l(t)]^2 = 1 \quad (7-b)$$

CP 長がチャネルの最大遅延時間よりも長いと仮定すると、受信信号ブロック  $\{r(n); n=-N_g \sim N_c - 1\}$  は次式で表される。ただし、 $P$  は平均受信電力、 $\eta(n)$  は加法性白色ガウス雑音である。

$$r(n) = \sqrt{2P} \sum_{l=0}^{L-1} h_l \tilde{x}(n - \tau_l) + \eta(n) \quad (8)$$

CP を除去した後の受信信号を  $N_c$ -point DFT により周波数領域信号  $\{R(k); k=0 \sim N_c - 1\}$  に変換する。

$$R(k) = \sqrt{\frac{2P}{N_c}} \sum_{n=0}^{N_c-1} \sum_{l=0}^{L-1} h_l \tilde{x}(n - \tau_l) \exp\left(-j2\pi \frac{n}{N_c} k\right) + \frac{1}{\sqrt{N_c}} \sum_{n=0}^{N_c-1} \eta(n) \exp\left(-j2\pi \frac{n}{N_c} k\right) \quad (9)$$

ここで、

$$\begin{cases} n' = n - \tau_l, & k = 0 \sim N_c - 1 \\ H(k) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \exp\left(-j2\pi \frac{\tau_l}{N_c} k\right) \\ X(k) = \sum_{n'=-\tau_l}^{N_c-\tau_l-1} \tilde{x}(n') \exp\left(-j2\pi \frac{n'}{N_c} k\right) \\ \Pi(k) = \frac{1}{\sqrt{N_c}} \sum_{n=0}^{N_c-1} \eta(n) \exp\left(-j2\pi \frac{n}{N_c} k\right) \end{cases} \quad (10)$$

とおくと、 $R(k) = \sqrt{2P} H(k) X(k) + \Pi(k)$  を得る。

$N_c$  サブキャリアからデマッピングにより、 $M$  サブキャリア  $\{\hat{R}(k); k=0 \sim M - 1\}$  が得られた後に FDE 重み  $W(k)$  を乗算し、スペクトルを補償した希望信号の周波数領域信号  $\hat{S}(k)$  を得る。

$$\begin{aligned} \hat{S}(k) &= W(k) \hat{R}(k) \\ &= \sqrt{2P} W(k) H(k) S(k) + W(k) \Pi(k) \\ &= \sqrt{2P} \hat{H}(k) S(k) + \hat{\Pi}(k) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\hat{H}(k)$  及び  $\hat{\Pi}(k)$  は FDE 重み  $W(k)$  を乗算後の等価チャネル及び等価雑音成分である。FDE 重みは先行研究

[3] より、周波数選択性を抑圧しつつ雑音強調を軽減できる最小二乗誤差(MMSE)規範に基づく重みを用いる。

$$W(k) = \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + \Gamma^{-1}} \quad (12)$$

$\hat{S}(k)$  を  $M$ -point IDFT により時間領域信号  $\hat{s}(n)$  に変換する。

$$\begin{aligned} \hat{s}(n) &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{S}(k) \exp\left(j2\pi \frac{k}{M} n\right) \\ &= \frac{\sqrt{2P}}{M} \left\{ \sum_{k=0}^{M-1} \hat{H}(k) \right\} s(n) \\ &\quad + \frac{\sqrt{2P}}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{H}(k) \left\{ \sum_{\substack{n'=0 \\ n' \neq n}}^{M-1} s(n') \exp\left(-j2\pi \frac{n-n'}{M} k\right) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{\Pi}(k) \exp\left(j2\pi \frac{k}{M} n\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$\hat{s}(n)$  の実部成分  $\tilde{s}_r(n)$  のみを取り出す。

$$\begin{aligned} \tilde{s}_r(n) &= \frac{1}{K} \hat{s}(n) \\ &= s(n) + \text{Re}\{\mu_{\text{ISI}}(n) + \mu_{\text{Noise}}(n)\} \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、残留 ISI 成分  $\mu_{\text{ISI}}(n)$  及び等価雑音成分  $\mu_{\text{Noise}}(n)$  は次式で表される。

$$\begin{cases} K = \sqrt{2P} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{H}(k) \\ \mu_{\text{ISI}}(n) = \frac{1}{K} \left\{ \sqrt{2P} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{H}(k) \left[ \sum_{\substack{n'=0 \\ n' \neq n}}^{M-1} s(n') \exp\left(j2\pi k \frac{n-n'}{M}\right) \right] \right\} \\ \mu_{\text{Noise}}(n) = \frac{1}{K} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{\Pi}(k) \exp\left(j2\pi \frac{k}{M} n\right) \right\} \end{cases} \quad (15)$$

$\tilde{s}_r(n)$  にデインターリーブし、希望信号  $\tilde{s}(n)$  を取り出す。

$$\tilde{s}(n) = \tilde{s}_r(i(n)), \quad n = 0 \sim N - 1 \quad (16)$$

$\tilde{s}(n)$  に逆正規化を行うことで  $\hat{d}_s(n)$  が得られる。 $\hat{d}_s(n)$  に  $A/2$  を加算し  $\hat{d}(n)$  を得る。

$$\hat{d}(n) = \hat{d}_s(n) + A/2 \quad (17)$$

$\hat{d}(n)$  に閾値を設定し、受信画像信号  $\tilde{d}(n)$  を得る。

$$\tilde{d}(n) = \begin{cases} A, & \hat{d}(n) > A \\ \hat{d}(n), & 0 \leq \hat{d}(n) \leq A \\ 0, & \hat{d}(n) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

## 2.2. インターリーブ

画像には空や海などの輝度値や色が一般的な領域や縞模様のように異なる色を用いて複数の平行あるいは交差するような領域が存在する。これらの領域における信号波形のスペクトルは特定の成分にピークを持つ。ピークとフェージングの落ち込みが重なった場合、スペクトルが歪んでしまい、信

号が正しく復元することができない,これを克服する方法としてインターリーブの導入をする.インターリーブを導入することで,特定のスペクトル成分にのみピークを持つような信号系列を回避でき,画質が改善する.

### 3. 計算機シミュレーション

表 1 に計算機シミュレーション条件を示す.

表 1 計算機シミュレーション諸元

| Data transmission              | Analog SC-FDE                             |
|--------------------------------|---|
| Modulation                     | Double sideband (DSB)                     |
| No. of subcarriers             | $N_c=1024$                                |
| No. of subcarriers per channel | $M=64$                                    |
| GI length                      | $N_g=16$                                  |
| Subcarrier mapping             | Distributed                               |
| Propagation Channel            | Frequency-selective block Rayleigh fading |
|                                | $L=16$ -path uniform Power delay profile  |
| FDE weight                     | MMSE                                      |
| Channel estimation             | Ideal                                     |

#### 3.1. シミュレーションに用いる画像

シミュレーションで用いる送信画像を図 2 に示す. 画像サイズは  $352 \times 240$  ピクセルである. 本来ならば, アナログ画像信号をサンプリングして得られるサンプル値信号を用いることが望ましいが, デジタル画像信号を逆量子化した値をサンプル値信号として伝送を行う.

図 2 の画像は 1 ピクセルあたり, 8 ビットの輝度値  $Y$  と色差成分  $U, V$  で保存されているデータを用いた. その  $Y$  及び  $U, V$  を逆量子化により  $\{0 \sim 255\}$  の値に変換する. 送信ブロックは全ピクセルの輝度値  $Y$ , 全ピクセルの色差成分  $U$ , 全ピクセルの色差成分  $V$  の順で構成する.



図 2 送信画像

#### 3.2. 評価方法

アナログ SC-FDE を用いた画像伝送の特性を評価するため次式で表せられる正規化平均二乗誤差(NMSE)を用いる.

$$NMSE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{s}(n) - s(n)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n)^2} \quad (19)$$

また, 受信画像の画質を評価するため次式で表せられるピーク信号対雑音電力比(PNSR)を用いる.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{MAX^2}{MSE} \quad (20-a)$$

$$MSE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{d}(n) - d(n)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} d(n)^2} \quad (20-b)$$

ここで,  $MAX$  は画像がとりうる最大のピクセル値であり, 本稿では 8 ビット画像を考慮するため  $MAX=255$  で仮定している.

#### 3.3. NMSE 特性

図 3 にアナログ SC-FDE を用いた画像伝送の NMSE 特性を示す. 中心極限定理を考慮した NMSE 特性の理論式は先行研究[3]より, 次式で与えられる.

$$NMSE = \frac{1}{2} \left\{ E[\mu_{ISI}(n)]^2 + E[\mu_{Noise}(n)]^2 \right\} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |\hat{H}(k)|^2 + \Gamma^{-1} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |W(k)|^2}{\left| \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{H}(k) \right|^2} \right] \quad (21)$$

比較のため, 従来のアナログ信号伝送の NMSE 特性を同時に示す. 図 3 より, アナログ SC-FDE を用いた画像伝送は従来のアナログ信号伝送に比べて NMSE 特性が改善されている. 従来のアナログ信号伝送は周波数非選択性フェージングの影響により伝送特性が大きく劣化してしまう. 一方, アナログ SC-FDE はアナログ信号の周波数成分を広帯域にマッピングすることで周波数選択性によるスペクトルの歪みを抑制しつつ, 周波数ダイバーシチ効果を得られたため特性が改善した.

インターリーブを適用しない場合の NMSE 特性は理論値よりも小さい値を示した. これは, ブロック内の信号成分が中心極限定理を満たさないためである. しかし, インターリーブすることでブロック内の信号成分が中心極限定理を満たし, NMSE 特性が理論値と一致した.

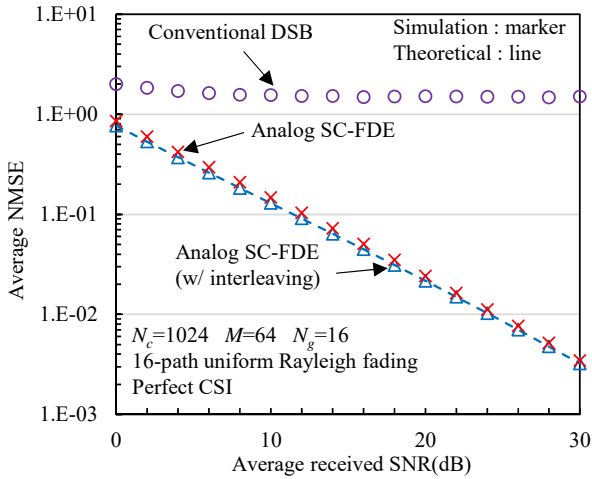


図 3 NMSE 特性

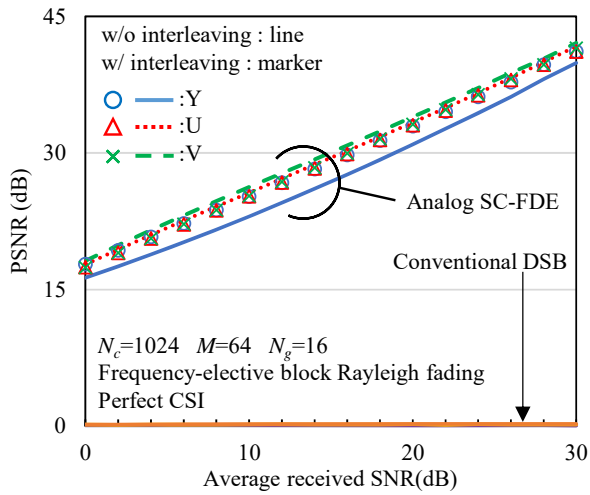


図 4 PSNR 特性

### 3.4. PSNR 特性

図 4 にアナログ SC-FDE を用いた画像伝送の PSNR 特性を示す。比較のため、従来のアナログ信号伝送の PSNR 特性も同時に示す。図 4 より、アナログ SC-FDE を用いた画像伝送は従来のアナログ信号伝送に比べて PSNR 特性が改善されている。これは、NMSE 特性と同様である。また、インターリーブ適用前と適用後と比較すると、輝度値 Y に関しては適用後のほうが適用前に比べ数 dB の改善がみられるが、色差成分 U, V に関して適用後は適用前に比べ数 dB 劣化している。これは、輝度値 Y と色差成分 U, V の性質が影響していると考えられる。図 5 に U, V の情報を持たないグレースケールの画像を示す。図 5 より、インターリーブ適用前の輝度値 Y はスペクトルの特定の成分にピークを持つ信号波形が多数存在し、色差成分 U, V は輝度値 Y に比べスペクトルに偏りがないと考えられる。そのため、インターリーブ適用後の輝度値 Y はスペクトルの偏りを回避でき、伝送特性が改善したことで PSNR 特性が改善したと考えられる。一方、インターリーブ適用後の色差成分 U, V は輝度値 Y の影響により、スペクトルの偏りができてしまい劣化した。



図 5 グレースケール画像

### 3.5. 受信画像

次に、図 6 に従来のアナログ信号伝送を用いた画像伝送及び図 7 にアナログ SC-FDE を用いた画像伝送により得られた受信画像を示す。ただし、SNR=20 dB である。図 6 より、従来のアナログ信号伝送の受信画像は周波数非選択性フェージングの影響により、元の画像が正しく得られないことがわかる。一方、図 7 より、アナログ SC-FDE を用いた場合の受信画像は元の画像を復元できていることがわかる。しかしながら、画像中の空の領域で連なった劣化がみられる。これは空の領域のスペクトルは特定の成分にピークを持つため、そのピークと等化後のフェージングの落ち込みが重なった場合に受信信号のスペクトルは歪んでしまう。歪んだスペクトルから得られる信号波形は元の信号波形とは異なってしまうため、ブロック単位の劣化が生じた。

図 8 にインターリーブ適用後の受信画像を示す。NMSE 特性及び PSNR 特性の測定ではインターリーブを適用した場合の特性はあまり改善が見られなかった。しかしながら、図 8 より、インターリーブを適用することで、スペクトルの特定の成分にピークを持つような信号波形を回避でき、ブロック単位の劣化が生じなくなることがわかる。

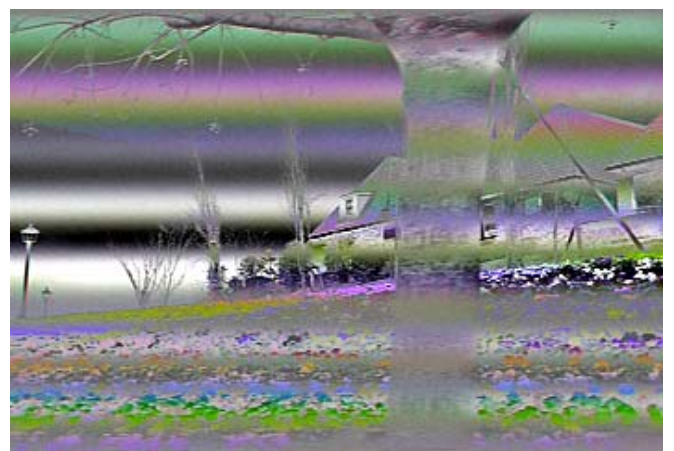


図 6 従来のアナログ信号伝送を用いた受信画像





図 7 アナログ SC-FDE を用いた受信画像



図 8 インターリービング適用後の受信画像

#### 4. むすび

本稿では、アナログ SC-FDE を画像伝送に適用し、画像伝送において、スペクトルの特定の成分にピークを持つような送信信号ブロック及びその信号が無線伝搬路に与える影響について明らかにした。計算機シミュレーションにより、アナログ SC-FDE を用いる画像伝送は従来のアナログ信号伝送に比べ優れた NMSE 特性および PSNR 特性が得られること、インターリービングすることでブロック単位での劣化を回避できることを明らかにした。

本稿では、アナログ SC-FDE を用いることで従来のアナログ信号伝送よりも伝送特性が改善することを示した。しかしながら、現在の画像伝送はデジタル信号伝送であるため、デジタル信号伝送を用いた画像伝送との比較をする必要がある。また、本稿の計算機シミュレーションで用いた画像はすでに量子化されたものであるため、実際にイメージセンサから受け取ったアナログ信号の画像を用いたシミュレーションを行う必要がある。

#### 文 献

- [1] Ericsson, *Ericsson mobility report*, Nov. 2014.
- [2] Rafeal C. Gonzalez, Richard E. woods, *Digital Image Processing*, 3<sup>rd</sup>-ed., Prentice Hall, 2007.
- [3] T. H. Vo, S. Kumagai, T. Obara and F. Adachi, "Analog Single-Carrier Transmission with Frequency-Domain

Equalization," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E97-B, no.9, pp.1958-1966, Sept. 2014.

- [4] T. H. Vo, S. Kumagai and F. Adachi, "Analog SC-FDE using SSB Technique," *IEICE Commun. Express (ComEX)*, vol.4, no.6, pp.173-179, Jun. 2015.

- [5] T. H. Vo, S. Kumagai and F. Adachi, "Subcarrier Combining for An Analog Single-Carrier Transmission," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conference (VTC2015-Fall)*, Boston, USA, Sept. 2015.