

OFDM受信方式におけるRF周波数誤差検知を用いた ICIキャンセラの提案

野原 健太[†] 和田 知久^{††}

^{††} 琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地

E-mail: [†]kentan@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, ^{††}wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)無線通信システムによる移動体無線通信において、ドップラー周波数シフト等で受信機のRF周波数誤差補正できない場合に、受信信号がOFDM信号の性質でもある直交性の保持が困難になり、特定の周波数の搬送波上のシンボルが他の周波数の搬送波のシンボルへ干渉するということが起こる、このような干渉をキャリア間干渉(ICI: Inter Carrier Interference)と呼び、受信信号のBERが著しく悪化する。本稿では、RF周波数誤差を検知し、FFT後の周波数領域での上記ICIを低減する方式を提案する。提案方式の有効性を評価するため、地上波デジタル放送(ISDB-T)に準拠したOFDM信号において計算機シミュレーションを行った。その結果、変調方式64QAMにおいて、従来のOFDM受信機と比較すると、BERが 4×10^{-2} の場合において約2倍のドップラー周波数シフトに対応可能であることが証明できた。

キーワード OFDM, ICI, RF周波数誤差

The design of frequency domain Inter Carrier Interference (ICI) canceling circuit and detecting Doppler frequency error for OFDM receiver

Kenta NOHARA[†] and Tomohisa WADA^{††}

^{††} Department of Information Engineering, University of the Ryukyus Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

E-mail: [†]kentan@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, ^{††}wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract In the wireless communication to mobile object for OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing). When the receiving sides could not correct Frequency Error by Doppler Shift, it is unable to keep orthogonality which is behavior of OFDM signal. One symbol in carrier wave of specific frequency interferes to carrier wave of another frequency. This interfering call ICI(Inter Carrier Interference). Therefore, receiving signal BER(Bit Error Rate) is wrong seriously. A new procedure is proposed to method that ICI reduction within frequency domain after FFT. Frequency Error is detected by degree of phase rotation of scattered pilots in between 4 symbol. In order to estimate effectivity of proposed method, we simulated that depend on the ISDB-T. Simulations show that proposed algorithm provides large reductions in the BER compared with the classic decoder in 64 QAM modulation. BER performance varies on Signal to Noise ratio for each carrier (CNR), the Doppler performance is increased by around two times at BER 4×10^{-2} .

Key words OFDM, ICI, Frequency Error

1. ま え が き

現在、移動通信において、マルチパス・フェージング環境下で高速・高信頼伝送を実現する伝送方式として、OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)無線通信が注目されている[2]。同システムでは、各信号に直交性を持たせ、且つFFT

によって分離が可能のため、周波数領域でこれまでよりも多くの情報量の信号を転送できるとして大変注目されている。日本では、地上波デジタル放送(ISDB-T)、無線LANなどに採用されている[1]。移動体との無線通信の際に、受信側が信号を受信すると、ドップラー周波数シフト等によってRF周波数誤差が発生する、よって、OFDM信号の性質でもある直交性が保

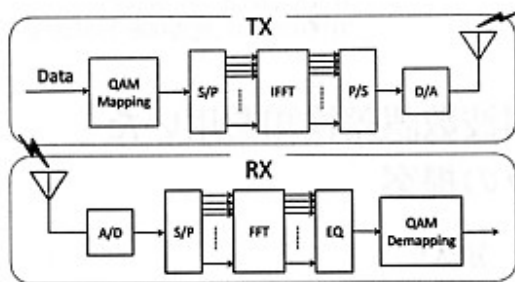


図1 OFDM 受信機

てなくなり、特定の周波数の搬送波上のシンボルが他の周波数の搬送波のシンボルへ干渉するということが起こる、このような干渉をキャリア間干渉 (ICI: Inter Carrier Interference) と呼ぶ、よって受信信号の BER が著しく悪化してしまう。したがって、ISDB-T 規格の受信機ではこうした問題も解決する手段が必要である。本稿では、RF 周波数誤差を検知し FFT 後の周波数領域での上記 ICI を低減する方式を提案し、その性能向上の評価を行った。RF 周波数誤差検知は、OFDM 信号のチャネル推定として使われるスカッタード・パイロット (SP) を用いて、ドップラー効果による 4 シンボル間の位相回転によって検知した。ICI 除去は、5 サブキャリア近傍の ICI 発生を行列式で表現し、逆行列計算をすることによって ICI 除去を行い、BER で比較しシステムの有効性を示す。本論文では、2 節において OFDM 通信システムの概要を説明する。3 節で、RF 周波数誤差検知の手法を説明する。4 節では、ICI キャンセラについて説明を行い、5 節では、RF 周波数誤差検知、従来受信機と BER で比較するシミュレーションの結果を示し、提案手法の評価を行う。6 節では、まとめを述べる。

2. OFDM 通信システム

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 通信システムとは、直交周波数多重分割方式と呼ばれる無線通信システムの一つであり現在、地上波デジタル放送やデジタル無線通信などに使用されている。すべての送信信号に直交性を保持させることによって、送信信号が周波数軸上で重なっても、受信機で FFT (高速フーリエ変換) によって分離させることが可能となり、周波数領域を有効に活用することによって、従来よりも多くの信号を送信することが可能である。

2.1 OFDM の構成

図1に OFDM の構成を示す。TX が送信機側、RX が受信機側である。最初に送信機側で、送信信号を複素信号点に配置する、次に、信号を IFFT (逆フーリエ変換) をすることによって、OFDM 信号を生成する、その後 D/A (Digital-to-Analog) 変換し、所望のアンテナに送信される。受信機側では、送信機側と逆の手順でデータの復調を行う、ただ異なる点は FFT (フーリエ変換) のあとに EQ (イコライズ) する箇所である、イコライズとは等化器のことで、各データの伝搬路推定を元に受信信号を補正することである。

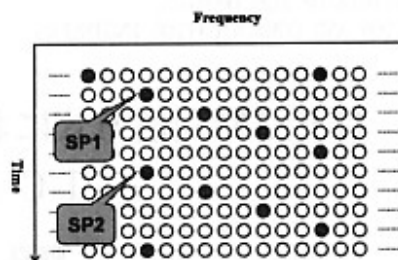


図2 スカッタードパイロット

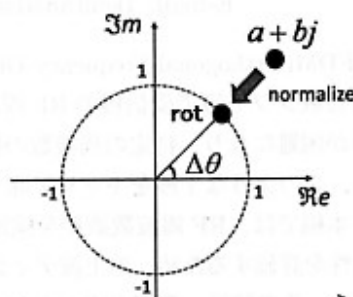


図4 rot 変数

Handwritten note:
 $\Delta\theta = \frac{2\pi f_d (T_g + T_e)}{4}$
 $\Delta\theta = \frac{2\pi f_d (T_g + T_e)}{4}$

3. RF 周波数誤差検知

OFDM 送信信号のキャリア配置図を2のように示す。1 シンボルにパイロットを12キャリア毎に配置し、次シンボルでは4シンボルずらして配置を行った。本研究では、等間隔に配置されたパイロット (スカッタードパイロット) の、時間軸方向4シンボル間の位相回転によって RF 周波数誤差の検知を行う。

3.1 検知手法

パイロット4シンボル間の RF 周波数誤差は、(回転角/2π) / (4シンボル長+ガードインターバル長) である。RF 周波数誤差を f_d 、シンボル長を T_e 、ガードインターバル長を T_g とすると以下の式になる。

$$f_d = \left(\frac{\Delta\theta}{2\pi} / 4(T_g + T_e) \right) \quad (1)$$

$$\Delta\theta = f_d \cdot 4(T_g + T_e) \cdot 2\pi \quad (2)$$

上の式によって求められた複素平面上の点と原点との角度 $\Delta\theta$ が、RF 周波数誤差の位相の回転角になる。 $\Delta\theta$ を求めるために、片方のパイロットに共役転置を加える。パイロット (SP1)、(SP2) は、それぞれ以下のように定義される。

$$SP1 = A_1 e^{j(\omega_0 t + \phi_1)} \quad SP2 = A_2 e^{j(\omega_0 t + \phi_2)} \quad (3)$$

ω_0 は位相回転の早さ、 ϕ は $t = 0$ のときの位相である。ここで $\theta = \omega_0 t + \phi$ と定義すると以下の式に変形される。

$$SP1 = A_1 e^{j\theta_1} \quad SP2 = A_2 e^{j\theta_2} \quad (4)$$

位相回転を求めるために、片方を共役転置し乗算する

$$A_1 e^{j\theta_1} \cdot (A_2 e^{j\theta_2})^* = A_1 A_2 \cdot e^{j(\theta_2 - \theta_1)} = A_1 A_2 \cdot e^{j(\Delta\theta)} \quad (5)$$

式(5)で求められた値 $A_1 A_2 \cdot e^{j(\Delta\theta)}$ に normalize 処理 (単

$$K = \frac{\exp(-j\pi\epsilon)}{(4.5\epsilon^4 + 15\epsilon^2 + 4)}$$

$$\begin{pmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ F4 \\ F5 \\ F6 \\ \vdots \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} (5\epsilon^2 + 4) & -(3\epsilon^3 + 4\epsilon) & -(2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & 4\epsilon^2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ (3\epsilon^3 + 4\epsilon) & (5\epsilon^2 + 4) & -(3\epsilon^3 + 4\epsilon) & -(2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & 4\epsilon^2 & \dots & 0 & 0 \\ -0.5\epsilon & (3\epsilon^3 + 4\epsilon) & (5\epsilon^2 + 4) & -(3\epsilon^3 + 4\epsilon) & -(2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & 4\epsilon^2 & \dots & 0 \\ 4\epsilon^2 & (2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & (3\epsilon^3 + 4\epsilon) & (5\epsilon^2 + 4) & -(3\epsilon^3 + 4\epsilon) & -(2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & 4\epsilon^2 & 0 \\ 0 & 4\epsilon^2 & (2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & (3\epsilon^3 + 4\epsilon) & (5\epsilon^2 + 4) & & & \\ 0 & 0 & \dots & 4\epsilon^2 & (2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & (3\epsilon^3 + 4\epsilon) & (5\epsilon^2 + 4) & -(3\epsilon^3 + 4\epsilon) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 4\epsilon^2 & (2\epsilon - 1.5\epsilon^3) & (3\epsilon^3 + 4\epsilon) & (5\epsilon^2 + 4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ICI1 \\ ICI2 \\ ICI3 \\ ICI4 \\ ICI5 \\ ICI6 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

図3 ICI キャンセル逆行列

位円化)を行ったものを rot と定義する。normalize 処理をすることによって、値が複素平面の単位円上に正規化される。 $A_1 A_2 \cdot e^{j(\Delta\theta)}$ の複素平面の値を $a + bj$ とすると、

$$rot = \frac{a + bj}{\sqrt{(a^2 + b^2)}} = e^{j(\Delta\theta)} \quad (6)$$

求められた rot に、 $\Delta\theta$ の値を代入する。

$$rot = e^{j(\Delta\theta)} = e^{j(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te))} \quad (7)$$

式(7)の値をオイラーの公式により以下のように表すことができる。

$$e^{j(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te))} = \cos(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te)) + j\sin(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te)) \quad (8)$$

rot は複素信号なので、実数と虚数 $\Re(rot) + j\Im(rot)$ で表現できる。よって、式(8)との関係式を以下のように示す。

$$\Re(rot) + j\Im(rot) = \cos(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te)) + j\sin(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te)) \quad (9)$$

$$\tan(2\pi fd \cdot 4(Tg + Te)) = \frac{\Im(rot)}{\Re(rot)} \quad (10)$$

$$2\pi fd \cdot 4(Tg + Te) = \text{atan}\left(\frac{\Im(rot)}{\Re(rot)}\right) \quad (11)$$

$$fd = \text{atan}\left(\frac{\Im(rot)}{\Re(rot)}\right) / (2\pi \cdot 4(Tg + Te)) \quad (12)$$

よって、RF 周波数誤差 fd を求めることができる。後述の ICI キャンセラの際に代入するパラメータ ϵ には f_0 によって正規化された値が代入される。

4. ICI キャンセラ

RF 周波数誤差が発生すると、一つのキャリアに対して、近似式で図6のような ICI が発生する。RF 周波数誤差 Δf を f_0 で正規化した値を ϵ 、 $\epsilon = \Delta f / f_0$ となる。

本稿では、5 サブキャリア近傍の ICI 発生を行列式で表現し、逆行列計算をすることによって ICI を除去する手法を提案する。受信機の FFT の直後、イコライザの手前で ICI キャンセルを行う。ICI キャンセラの位置を図7に示す。

$$r = \exp(j\pi\epsilon)$$

$$\begin{pmatrix} ICI1 \\ ICI2 \\ ICI3 \\ ICI4 \\ ICI5 \\ ICI6 \\ \vdots \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} 1 & -\epsilon & -0.5\epsilon & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon & 1 & -\epsilon & -0.5\epsilon & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0.5\epsilon & \epsilon & 1 & -\epsilon & -0.5\epsilon & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0.5\epsilon & \epsilon & 1 & -0.5\epsilon \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0.5\epsilon & \epsilon & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ F4 \\ F5 \\ F6 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

図5 ICI 発生行列式

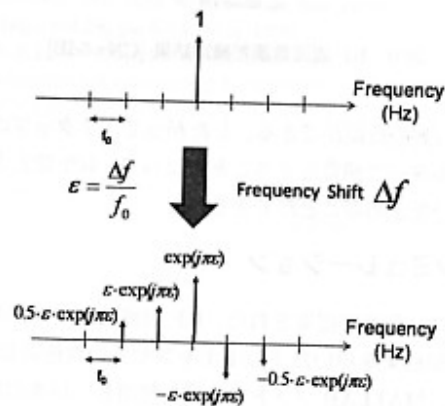


図6 ICI 発生近似式

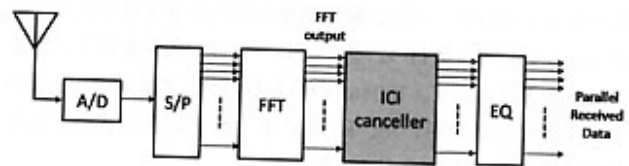


図7 受信機のフローチャート

次に、ICI 発生行列式を式5に示す。 $(F1, F2, F3...)^T$ FFTされた後の受信信号で、 $(ICI1, ICI2, ICI3...)^T$ が受信信号に対して付加された ICI の値である。ICI 発生行列は五重の対角行列となっているが、一つのサブキャリアの ICI が近傍5サブキャリアに対して影響を及ぼすことを意味している。干渉するサブキャリアはさらに広範囲だが、今回は近傍5サブキャリアの ICI を対象とした。

図3の式を逆行列で表現すると、図5の式のように7重体格

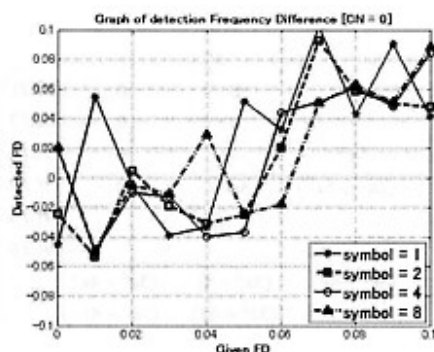


図 8 RF 周波数誤差検知結果 [CN=0dB]

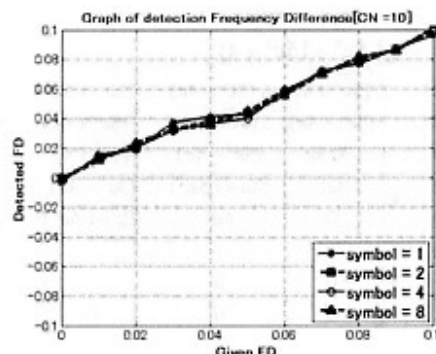


図 10 RF 周波数誤差検知結果 [CN=10dB]

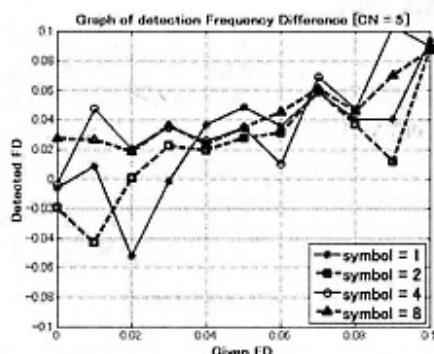


図 9 RF 周波数誤差検知結果 [CN=5dB]

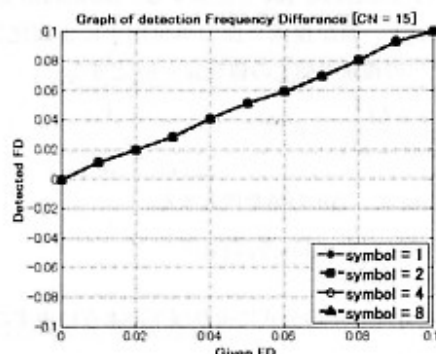


図 11 RF 周波数誤差検知結果 [CN=15dB]

行列の逆行列の近似ができる。したがって、7タップの複素 FIR フィルターで演算をすることによって、ICI 除去された元の受信信号を求めることができる。

5. シミュレーション

本章では、前章で提案された、RF 周波数誤差検知の性能評価と、検知結果を用いた ICI キャンセルの性能評価を行う。評価には、MATLAB ソフトウェアを使用し、日本の地上波向けデジタル放送サービス (ISDB-T) 規格に準じたシミュレーションを行った。まず最初に、RF 周波数誤差検知のシミュレーションを行い、次に、検知結果を用いた ICI キャンセルのシミュレーションを行う。シミュレーション条件を表 1、到来波条件を表 2 に示す、1008us の OFDM シンボルに 8192 点の FFT ポイントを用いた、HDTV 地上波デジタルサービスを想定、変調方式は 64QAM である。

5.1 RF 周波数誤差検知の性能評価

本稿では、全部で 5617 サブキャリア、124 シンボルのデータを受信側に送信する。1 シンボル、432 サブキャリア領域の 36 個の rot の平均を 1 ブロックと定義し、ブロックの総数は全部で 13×120 個である、次に、各ブロックに対してシンボル方向に平均処理を行い、これを $r(i) (i = 1, 2, \dots, 13)$ と定義する、RF 周波数誤差検知のシミュレーションでは、一度に平均処理をするブロック数を 1, 2, 4, 8 の 4 種類とした。今回は、最低限の計算量に抑えるために $r(7)$ の数値でシミュレーションを行った。

表 1 シミュレーション条件

FFT サイズ	8192
FFT サンプルング周期	0.123us
サブキャリア数	5167
シンボル長	$T_e = 1008\text{us}$
ガードインターバル長	$T_g = T_e/8$
サブキャリア間隔	992Hz
変調方式	64QAM

表 2 到来波条件

	遅延時間	DU 比	RF 周波数誤差
第一波 (直接波)	0 point	0.0dB	+fd
第二波 (遅延波)	100 point (12.3us)	3.0dB	+fd

5.1.1 検知結果

図 8、図 9、図 10、図 11 に検知結果を示す、横軸が定義した正規化された RF 周波数誤差 $\epsilon = (fd/f_0)$ 、縦軸が提案手法によって検知された RF 周波数誤差 ϵ' である。CN 比が 0dB, 5dB の場合は同時平均処理のブロックの個数にも関係なく、良い結果を得ることができなかったが、CN 比が 10dB, 15dB になると結果が良くなっているのがわかる。CN 比 15dB 以上になれば、ほぼ完全に近い状態で、RF 周波数誤差検知が可能だとわかる。同 CN 比で、ブロック数によっての変化はあまり見られなかった。

5.2 ICI キャンセルの性能評価

前節の RF 周波数誤差検知された ϵ' を利用した ICI キャンセルの性能評価を行う。従来の OFDM 受信機と、提案手法と

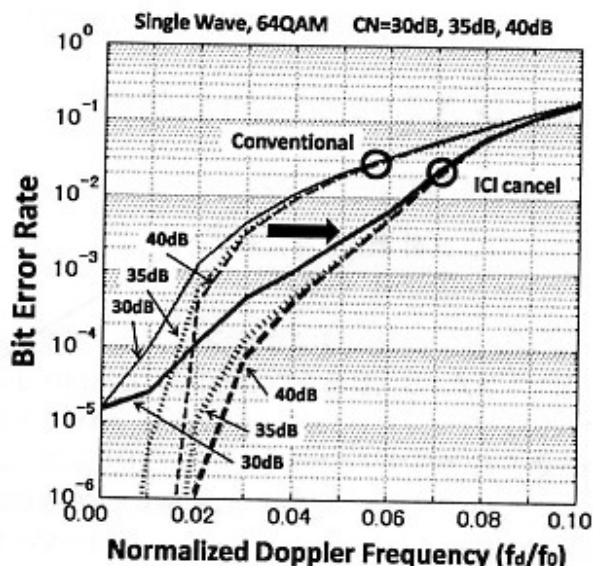


図 12 従来の受信機と ICI キャンセラ受信機の BER での比較 (1 波)

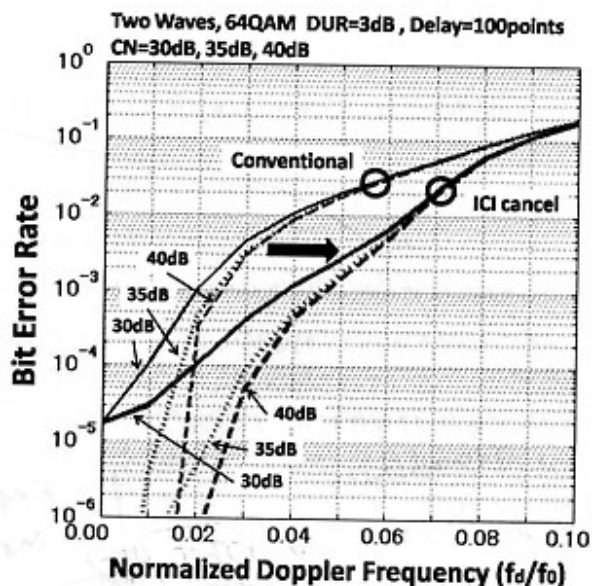


図 13 従来の受信機と ICI キャンセラ受信機の BER での比較 (1 波)

取り入れた性能評価との BER(Bit Error Rate) を比較して性能の評価を行った。

5.2.1 シミュレーション結果

図 12、図 13 にシミュレーションの結果を BER グラフで示す、青線が従来の受信機、赤線が提案された ICI キャンセラ受信機である。図 12 は到来波は直接波のみ、図 13 は遅延波が一波追加されて 2 波、遅延波の DU 比は 3dB、遅延は 100 点 = 12.3us である。横軸は定義した正規化された RF 周波数誤差 $\varepsilon = (\Delta f/f_0)$ 、縦軸は受信信号の BER(Bit Error Rate) である。これは、実際の ISDB-T の企画に準じた遅延環境である。従来の受信機と比較すると、ICI キャンセラを行った OFDM 受信機の BER の低減が確認できた。同じ BER で比較すると、BER が 4×10^{-2} の場合において、従来の受信機より約 2 倍のドップラー周波数シフトに対応可能であることが確認できた。

6. まとめ

OFDM 受信機でのドップラー周波数シフト等の影響において、RF 周波数誤差検知結果による ICI キャンセル回路を提案した。スキッタード・パイロット (SP) の 4 シンボル間の位相回転で RF 周波数誤差の検知を行い、ICI 除去は ICI 発生の近似式を行列式で定義し、回路構成を簡潔にするために 7 タップの複素 FIR フィルターを用いて ICI キャンセルを行った。シミュレーションでは、日本地上波デジタル放送 ISDB-T 規格において、8K FFT、64QAM 変調方式において、BER が 4×10^{-2} の場合において、従来の受信機より約 2 倍のドップラー周波数シフトに対応可能であることが確認できた。今後の課題としては、本稿のシミュレーションでは、到来波の向きがすべて同じという条件だったが、これでは現実的ではない。今後は、向きの異なる複数の到来波条件での RF 周波数誤差検知を実現したいと考える。

文 献

- [1] "Channel coding, frame structure and modulation scheme

for terrestrial integrated services digital broadcasting (ISDBT)", ITU-R WP11A, May 1999.

- [2] J.A.C Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come", IEEE Comm. Mag., vol.28, pp.5-14, May 1990.
 [3] B.-S.Lee, "Doppler effect compensation scheme based on constellation estimation for OFDM system", ELECTRONICS LETTERS, Vol.44 No.1, 3rd January 2008.
 [4] 伊丹 誠, "デジタル放送 移動通信のための OFDM 変調技術", トリケップス, March 2000.
 [5] 永塚 守, "デジタル通信システムのための MATLAB プログラム事例解説", トリケップス, July 2000.