

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560448

研究課題名(和文)理論解析結果に基づく適応制御を用いたエルミート対称符号化 OFDM 方式

研究課題名(英文) Hermite-symmetric subcarrier coded OFDM systems with adaptive control based on theoretical analysis

研究代表者

笹森 文仁 (Sasamori, Fumihito)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：70298090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000 円

研究成果の概要(和文)：電波を利用した無線通信では、回折や反射が原因で電波の受信電力が著しく変動する。受信電力が低下した場合、OFDM方式における複数の無線チャネルを使用して同一の変調信号を送信(繰り返し符号化)し、受信側で合成することで伝送品質の劣化を防ぐことができるが、伝送レートの低下を招く要因となっていた。一方、エルミート対称性を考慮した繰り返し符号化を施すことで、伝送品質と伝送レートの両方を維持・向上することができるが、電波の状態や繰り返し符号化数によってその度合いは大きく異なる。本研究では、理論解析による定量評価手法を確立し、常に最良の効率が得られるような適応制御を実装した伝送特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In wireless communication systems with a radio wave, received power of the radio wave drastically fluctuates because of diffraction and/or reflection. Even when the received power is low, the transmission quality can be maintained by transmitting the same modulated signal repeatedly over some wireless channels in OFDM systems, which is called 'repetition coding'. But the repetition coding has the demerit that the transmission rate is degraded. On the other hands, the transmission quality and the transmission rate can be maintained or improved by applying the repetition coding considering Hermite symmetry. The effect of Hermite symmetric repetition coding depends on the condition of wireless channels and/or the number of repetition. In this research, we theoretically analyze the effect and propose an adaptive control based on the theoretical result aiming for the best efficiency at any condition.

研究分野：通信工学

キーワード：OFDM 算式 エルミート対称符号化 適応制御 ダイバーシチ ビット誤り率 スループット 理論解析 閉じた形の計

## 1. 研究開始当初の背景

近年、携帯電話の加入者数が頭打ちする中、スマートフォンの急速な普及による回線容量の逼迫が問題となっている。現在、携帯電話回線によるデータ通信は定額で使い放題となっているが、各携帯電話事業者では、Wi-Fi (無線 LAN) 回線や WiMAX 回線へデータを分散させる「オフロード」を積極的に進めたり、米 AT&T 社やベライゾン・ワイヤレス社のように「使い放題廃止」へ向けた検討も始めたりしている。したがって、限られた周波数帯域 (チャンネル) で可能な限り高速伝送を実現し、デジタル無線回線のチャンネル利用効率を向上させることが急務となっている。

## 2. 研究の目的

電波を利用した無線通信では、建物や山などによる回折・反射 (マルチパス) や、移動による無線周波数のドップラー変動が原因で、電波の受信電力が著しく変動するフェージング現象が発生する。受信電力が低下した場合、OFDM 方式における複数の無線チャンネル (サブキャリア) を使用して同一のデジタル変調信号を送信 (繰り返し符号化) し、受信側で合成することで、ダイバーシチ効果により伝送品質の劣化を防ぐことができる。一方で、冗長な信号を送信しているため、伝送レートの低下を招く要因となっている。

本研究では、伝送品質と伝送レートの両方の維持・向上を目的として、離散フーリエ変換の性質であるエルミート対称性を考慮した繰り返し符号化 (エルミート対称符号化) を施すことによる効果を理論的に解析する。また、常に最良の効率が得られるような適応制御を実装したときの伝送特性を明らかにする。最後に、更なる特性改善を目指した方式の提案についても言及する。

## 3. 研究の方法

### (1) エルミート対称符号化の効果に関する理論解析

はじめに、エルミート対称符号化を適用したことによる特性改善効果について理論的に解析する。具体的には、無線回線の同相チャンネルと直交チャンネルとで別々のデータを送信し、受信機側で正確にチャンネルを分離して各々のデータを復元できることを想定したときの伝送特性を算出できる閉じた形の計算式を導出する。伝送特性として、伝送品質を評価する指標であるビット誤り率と、伝送速度を評価する指標であるスループットの 2 特性について理論的に解析する。効率という観点では、前者は電力利用効率、後者はチャンネル利用効率の指標となる。

次に、受信電力が著しく低下した場合を想定し、繰り返し符号数を 4 まで拡張するとと

もに、符号化の方向 (ダイバーシチ方向) を周波数方向だけでなく時間方向へも拡張することで、更なる特性改善効果が得られることを理論的に解析する。

上述した理論解析結果の妥当性を評価するために、計算機シミュレーション結果と一致することを確認する。

### (2) 無線回線の同相チャンネルと直交チャンネルの分離復調

(1) の解析では、無線回線の同相チャンネルと直交チャンネルとで別々のデータを送信し、受信機側で正確に (理想的に) チャンネルを分離して各々のデータを復元できることを想定しているが、(2) の検討では、送信機から定期的に送信される既知信号を使用して無線回線の伝達関数を推定し、データを分離復調するアルゴリズムを計算機シミュレーション上に実装したときの伝送特性について検討する。

### (3) 適応制御の実装

(1) の解析により導出した計算式を制御に活用することで、常に最良の効率が得られるような送受信機の制御を簡単かつ瞬時に判断・選択することができる。具体的な制御項目としては、繰り返し符号化数、符号化方向、デジタル変調多値数が挙げられる。無線回線上の周波数変動と時間変動を監視し、適応制御を計算機シミュレーション上に実装したときの伝送特性について検討する。

### (4) 更なる特性改善を目指した方式の提案

マルチアンテナ技術や誤り訂正技術、多シンボル遅延検波といった雑音・フェージング対策技術を施すことで更なる特性改善が可能となるが、装置や信号処理の複雑さがデメリットになる場合がある。そこで、スペクトル拡散技術の一種である M-ary SS 方式と OFDM 方式を融合した M-ary SS/OFDM 方式に着目する。複雑度をそれほど増加させずに特性を改善させることを目的として、符号長の短い拡散符号を採用し、繰り返し符号化を施したときの伝送特性について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) エルミート対称符号化の効果に関する理論解析

繰り返し符号化数  $L$  を 2 と設定し、平均受信電力対雑音電力比 (Average CNR) に対する平均ビット誤り率と平均スループットの理論特性を図 1 と図 2 にそれぞれ示す。ただし、従来の繰り返し符号化 OFDM (RC-OFDM) 方式のデジタル変調は 16QAM、エルミート対称符号化 OFDM (HC-OFDM) 方式のデジタル変調は QPSK とし、マルチパスの広がり (正規化した遅延スプレッド  $\sigma_r/T_s$ ) を 0.01 に設

定している. 同図中の RC-OFDM (16QAM) と HC-OFDM (QPSK) を比較すると, 後者の提案方式の方がビット誤り率とスループットの両面で良好な特性を示していることがわかる. すなわち, 電力利用効率とチャンネル利用効率がともに向上していることが確認できる. また, 理論値を線, シミュレーション値をプロット点で示しているが, 両者が一致していることから, 理論解析による計算式の妥当性が確認できる. 計算式を制御に活用することで, 簡単かつ瞬時に最良の方式を選択できることから, 理論解析の意義が確認できる.

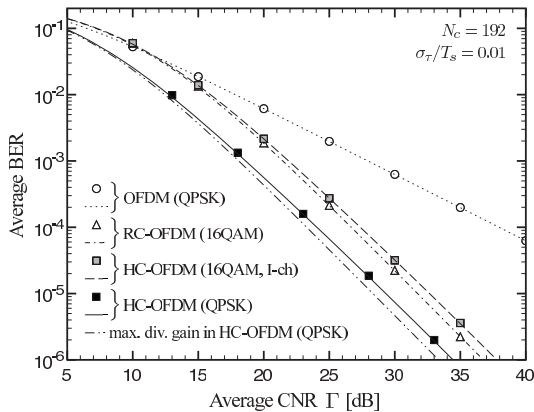


図1 平均ビット誤り率の理論特性 ( $L=2$ )

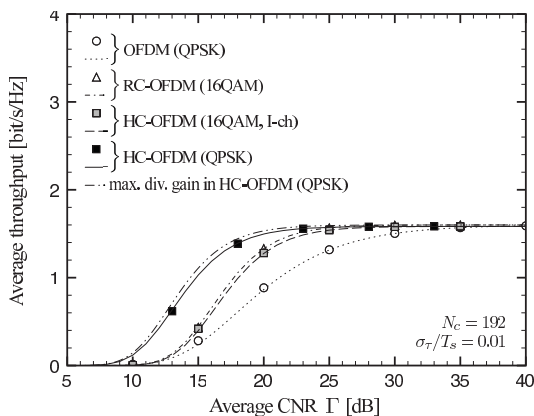


図2 平均スループットの理論特性 ( $L=2$ )

一方, 受信電力が著しく低下した場合は想定し, 繰り返し符号化数  $L$  を 4 と設定したときの平均ビット誤り率特性を図 3 に示す. ただし, 正規化したドップラー周波  $f_D T_s$  を 0.005, 正規化した遅延スプレッド  $\sigma_\tau / T_s$  を 0.001 に設定している. また, 符号化方向を周波数方向 (f-div) だけでなく, 周波数と時間の両方向 (tf-div) に設定したときの特性も図示している. 同図より, ドップラー変動による時間変動と, マルチパスの広がりによる周波数変動の両方のダイバーシチ効果を活用することで最良の特性が得られていることが確認できる. また, 図 1 と同様に, 理論解析結果の妥当性も確認できる.

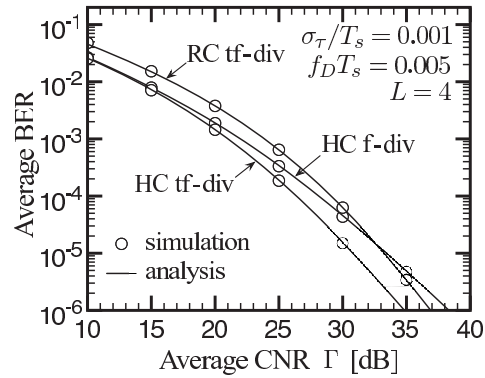


図3 平均ビット誤り率の理論特性 ( $L=4$ )

(2) 無線回線の同相チャンネルと直交チャンネルの分離復調

繰り返し符号化数  $L$  を 2 と設定したときの平均ビット誤り率特性を図 4 に示す. ただし, 正規化ドップラー周波  $f_D T_s$  を 0.005 (変動が遅い場合) と 0.02 (速い場合) に設定している. 同図より, 提案方式である HC-OFDM 方式の方が良好な特性を示していることが確認できる. また, ドップラー変動が速くなると無線回線の伝達関数の推定に誤差が生じるため, 受信電力 (Average CNR) が大きくなってビット誤り率が改善できずエラーフロアが発生するが, 推定精度を向上させる技術の提案は今後の課題である.

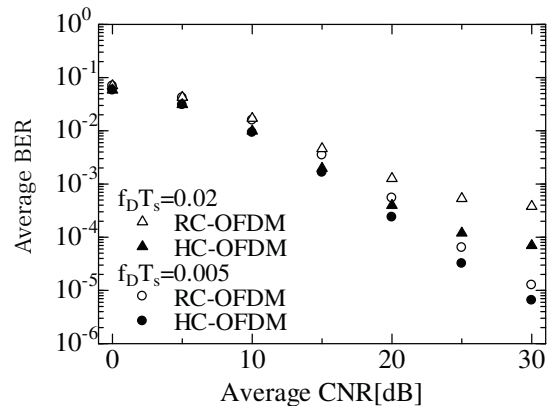


図4 分離復調を実装したときの平均ビット誤り率特性 ( $L=2$ )

(3) 適応制御の実装

デジタル変調方式として BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM の 4 種類, 繰り返し符号化数として 1 から 4 までの適応制御を想定したときの平均スループット特性を図 5 に示す. ただし, 正規化遅延スプレッド  $\sigma_\tau / T_s$  を 0.01 に設定している. また, 繰り返し符号化数のみ固定した場合 (図中の凡例の  $L=1\sim 4$ ) の特性も同時に図示している. なお, 同図中のしきい値の説明は紙面の都合上省略するが, 凡例が「80%」となっている特性が繰り返し符号化数も適応制御したときの特性である. 繰り返し

し符号化数が  $L=4$  の場合、電力利用効率が向上して低い受信電力（低 CNR）の領域でスループット特性が最良になるが、高 CNR の領域では同特性が頭打ちになる（チャンネル利用効率は小さい）。一方、繰り返し符号化数が  $L=1$  の場合は逆の性質を示すが、繰り返し符号化数を適応的に制御することにより、CNR の値にかかわらず常に最良のスループット特性を示していることがわかる。すなわち、理論解析結果に基づいた適応制御の効果が発揮されていることが確認できる。

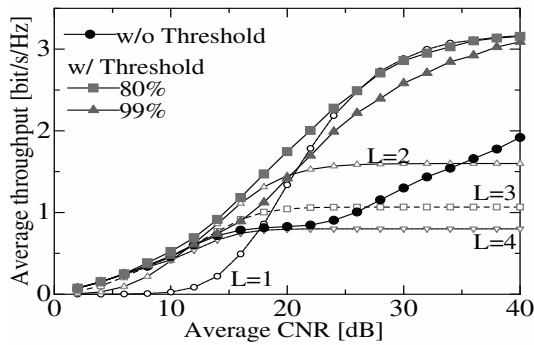


図5 適応制御を実装したときの平均スループット特性

(4) 更なる特性改善を目指した方式の提案

符号長 8 の短い拡散符号を用いた M-ary SS/OFDM 方式に関する初期検討において、フェージングの影響が小さい環境（送受信機が見通し内にあり、電波が直接到来する環境）で特性改善効果が顕著に見られるが、フェージングの影響が大きくなるにつれて効果が薄れることがわかったため、繰り返し符号化と併用したときの伝送特性について検討する。直接波対フェージング散乱波の電力比  $K$  をパラメータとしたときの平均ビット誤り率特性を図 6 に示す。フェージングの影響が大きい ( $K$  の値が小さい) ときは RC-OFDM の特性が良好であるが、 $K$  の値が大きくなるにつれて M-ary SS/OFDM の特性は劇的に改善する。一方、両者を併用した M-ary SS/RC-OFDM 方式は、どの環境においても良好な特性を示していることが確認できる。

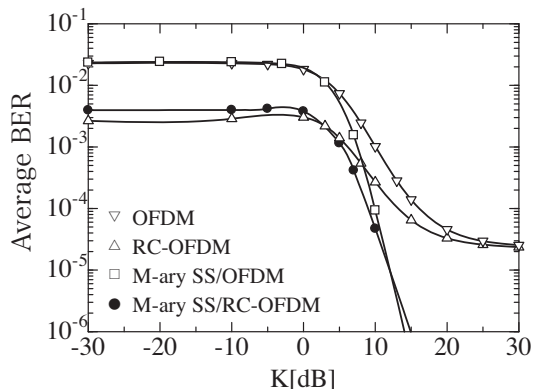


図6 M-ary SS/OFDM 方式の平均ビット誤り率特性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① F. Sasamori, S. Asada, O. Takyu, and S. Handa, Precise BER Analysis of Repetition Coded OFDM Systems over Time- and Frequency-Selective Rayleigh Fading Channels, IEICE Transactions on Communications, vol.E98-B, no.1, pp.88-98, Jan. 2015, 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E98.B.88
- ② A. Toda, F. Sasamori, O. Takyu, and S. Handa, Robustness against Fading Fluctuation in Hermite-Symmetric Subcarrier Coding for OFDM Systems, Proc. IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC) 2014, P-2-35, pp.834-835, Oct. 2014, 査読有.  
DOI: 10.1109/ICTC.2014.6983305
- ③ S. Sasano, F. Sasamori, O. Takyu, and S. Handa, Performance Evaluation of Acoustic OFDM with Repetition Coding, Proc. IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC) 2014, P-2-22, pp.798-799, Oct. 2014, 査読有.  
DOI: 10.1109/ICTC.2014.6983292
- ④ W. Koike, F. Sasamori, O. Takyu, and S. Handa, Adaptive Control Based on Theoretical Analysis in RC-OFDM Systems, Proc. IEEE 2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC), S6-2-1, pp.581-582, Oct. 2013, 査読有.  
DOI: 10.1109/ICTC.2013.6675424
- ⑤ K. Hayashi, F. Sasamori, O. Takyu, and S. Handa, Design and Implementation of OFDM Signal Processing on PSoc Microcontroller, Proc. IEEE 2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC), S4-4-1, pp.391-392, Oct. 2013, 査読有.  
DOI: 10.1109/ICTC.2013.6675379
- ⑥ Y. Yu, S. Handa, F. Sasamori, and O. Takyu, Adaptive Iterative Decoding of Finite-Length Differentially Encoded LDPC Coded Systems with Multiple-Symbol Differential Detection, IEICE Transactions on Communications, vol.E96-B, no.3, pp.847-858, March 2013, 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E96.B.847
- ⑦ F. Sasamori and S. Handa, Performance

Analysis of Hermite-Symmetric Subcarrier Coding for OFDM Systems over Fading Channels, IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E95-A, no. 12, pp. 2461-2469, Dec. 2012, 査読有.  
DOI: 10.1587/transfun. E95. A. 2461

- ⑧ Y. Yu, S. Handa, F. Sasamori, and O. Takyu, Improved Soft-Output M-Algorithm for Differential Encoded LDPC Coded Systems with Multiple-Symbol Differential Detection, Proc. 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1986-1992, Sept. 2012, 査読有.  
DOI: 10.1109/PIMRC.2012.6362679

[学会発表] (計 15 件)

- ① 土屋 拓斗, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, RC-OFDM システムにおける適応変調を考慮したスループットの理論解析, 電子情報通信学会信州大学 Student Branch 論文発表会, 2014 年 12 月 18 日. 信州大学 (長野市) .
- ② 米沢 祐太, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, PSoC マイコンへの可視光 OFDM 通信の実装と評価, 電子情報通信学会信州大学 Student Branch 論文発表会, 2014 年 12 月 18 日. 信州大学 (長野市) .
- ③ 水倉 佑輔, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 短い拡散符号を用いた M-ary/OFDM システムの特性評価, 電子情報通信学会信越支部大会, 2014 年 10 月 4 日. 信州大学 (長野市) .
- ④ 金森 正樹, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, LDPC 符号化と繰り返し符号化を組み合わせた OFDM システムの特性評価, 電子情報通信学会信越支部大会, 2014 年 10 月 4 日. 信州大学 (長野市) .
- ⑤ 戸田 陽, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, エルミート対称符号化 OFDM システムの特性評価, 電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日, 長岡技術科学大学 (長岡市) .
- ⑥ 林 晃平, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 様々な無線伝送路環境を想定した OFDM 信号処理の設計と実装, 電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日, 長岡技術科学大学 (長岡市) .
- ⑦ 小池 涉, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, RC-OFDM システムにおける理論解析に基づいた適応制御, 電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日, 長岡

技術科学大学 (長岡市) .

- ⑧ 水倉 佑輔, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 短い拡散符号を用いた M-ary/OFDM 方式の特性評価, 電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日, 長岡技術科学大学 (長岡市) .
- ⑨ 篠野 茂, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 繰り返し符号化を適用した音響 OFDM の特性評価, 電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日, 長岡技術科学大学 (長岡市) .
- ⑩ 金森 正樹, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 様々な無線伝送路環境を想定した LDPC 符号化 OFDM システムの特性評価, 電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日, 長岡技術科学大学 (長岡市) .
- ⑪ 児玉 遼, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, PSoC マイコンへの可視光 OFDM 信号処理の設計と実装, 電子情報通信学会信州大学 Student Branch 論文発表会, 2012 年 12 月 19 日, 信州大学 (長野市) .
- ⑫ 小池 涉, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 適応制御を考慮した RC-OFDM システムの一検討, 電子情報通信学会信州大学 Student Branch 論文発表会, 2012 年 12 月 19 日, 信州大学 (長野市) .
- ⑬ 小池 涉, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, 適応変調技術を用いた RC-OFDM システム, 電子情報通信学会信越支部大会, 2012 年 10 月 13 日, 新潟大学 (新潟市) .
- ⑭ 林 晃平, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, PSoC マイコンへの OFDM 信号処理の設計と実装 -音声回線を想定した変調処理-, 電子情報通信学会信越支部大会, 2012 年 10 月 13 日, 新潟大学 (新潟市) .
- ⑮ 児玉 遼, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎, PSoC マイコンへの OFDM 信号処理の設計と実装 -シンボルタイミング同期処理-, 電子情報通信学会信越支部大会, 2012 年 10 月 13 日, 新潟大学 (新潟市) .

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

笹森 文仁 (SASAMORI, Fumihito)  
信州大学・学術研究院工学系・准教授  
研究者番号: 70298090