

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：14101
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2013～2015
 課題番号：25420367
 研究課題名(和文) 時間軸トレーニング信号を用いたSC-OFDM通信方式用伝送路推定方式に関する研究

 研究課題名(英文) Study on Channel Estimation Method of using Time Domain Training Sequence for SC-OFDM Signal

 研究代表者
 小林 英雄 (KOBAYASHI, Hideo)

 三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

 研究者番号：60303749

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：時間軸トレーニング信号を用いたDFTS-OFDMならびにOFDM通信方式用の高精度伝送路特性推定方式と、推定された伝送路行列を用いた時間軸等化方式について提案した。伝送路推定方式の特長は、時間軸トレーニング信号をOFDM時間軸信号の一部を利用し、更に時間軸上で三角波窓関数を利用することにより帯域外輻射電力を軽減可能とし、高速移動通信環境下で高精度な伝送路推定精度を達成可能としている。時間軸等化方式の特長は、高速移動通信環境下で発生するチャネル間干渉(ICI)を少ない演算量で軽減可能とし、優れた誤り率特性を達成可能としている。

研究成果の概要(英文)：This project proposed a new design of time domain TS signal of using time domain triangular window function for DFTS-OFDM and OFDM signals which can reduce the undesirable spectrum regrowth with keeping higher CIR estimation accuracy. This project also proposed a time domain equalization (TDE) method of using CIR matrix in the time domain. The salient feature of proposed TDE method is to employ the partial differentiation for the time domain CIR matrix in solving the maximum likelihood (ML) equation. By using the partial differentiation, the coefficient matrix of simultaneous equations becomes the perfect symmetric banded matrix which enables to employ a low-complexity parallel blocks inverse matrix algorithm. From various computer simulation results, it was concluded that the proposed channel estimation and TDE methods can achieve higher estimation accuracy and better BER performance as compared with the conventional methods in higher time-varying fading channels.

研究分野：無線通信システム

キーワード：DFTS-OFDM OFDM 時間軸トレーニング信号 伝送路推定 高速移動通信 時間軸等化 最尤推定法 逆行列演算

1. 研究開始当初の背景

SC-OFDM 方式の一形態である DFTS-OFDM 方式は、OFDM 方式と比較して PAPR 特性が優れていることから第 4 世代移動通信方式の上り回線用の通信方式として採用されている。本方式の伝送路特性推定法としては、周波数軸上のパイロット信号を用いた場合には、PAPR 特性が劣化することにより推定精度が劣化する問題があった。一方、DFTS-OFDM 方式ならびに OFDM 方式の共通の問題として、高速移動通信環境下における高精度な伝送路推定法と等化方式の実現が求められていた。高速移動通信環境下では、シンボル内の伝送路インパルス応答(CIR)が時間変動することに起因してサブキャリア間干渉(ICI)が発生し、従来方式である 1 タップ周波数軸等化方式では、ビット誤り率(BER)特性が大幅に劣化する問題があった。これに対して、ICI 軽減を可能とする時間サンプル毎の CIR を用いた周波数軸等化(TDE)方式が提案されている。本方式は、優れた BER 特性を達成可能としているが、シンボルごとの等化处理において伝送路行列の逆行列演算が必要となり、演算量が大幅に増加するという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、DFTS-OFDM 方式ならびに OFDM 方式に対する上記の課題に対して、以下の解決手法を提案し、これら課題を解決することを目的とした。

- (1) 高速移動通信環境下で運用される DFTS-OFDM 方式ならびに OFDM 方式に適用可能な時間軸トレーニング(TS)信号を用いた高精度伝送路推定法の提案
- (2) 三角窓関数を利用した時間軸 TS 信号の帯域外輻射電力低減法の提案
- (3) 高速移動通信環境下における ICI 低減法として、逆行列演算量の削減を可能とする時間軸等化(TDE)方式の提案
- (4) 上記(1)(2)(3)の提案方式に対して、計算機シミュレーションによる特性評価を実施し、提案方式の有効性を実証する。

3. 研究の方法

(1) TS 信号を用いた伝送路推定法の提案

図 1 に、提案する時間軸 TS 信号の送信フレーム構成とマルチパスフェージング環境下における受信信号の様子を示す。図 1(a)に示すように、受信側で既知の時間軸 TS 信号を送信データシンボルの両端に付加する。送信された時間軸 TS 信号は、図 1(b)に示すようにマルチパスフェージングの影響を受け、 m シンボル目の n サンプル目の受信 TS 信号 $y_E(m, n)$ が受信される。ここで、伝送路で発生している CIR を未知数とすると、受信 TS 信号 $\hat{y}_E(m, n_2)$ は次式で与えられる。

$$\hat{y}_E(m, n_2) = \sum_{l=0}^{S-1} \hat{h}_l(m) \cdot d_2(m, n_2 - l), \quad (1)$$

$$0 \leq n_2 \leq S-1$$

但し、 $\hat{h}_l(m)$ は m シンボル目における l 波目の遅延波の伝送路インパルス応答(CIR)、 $d_2(m, n_2)$ は n サンプル目の TS 信号、 S は TS 信号長を示す。未知数である $\hat{h}_l(m)$ は、受信信号 $y_E(m, n_2)$ と式(1)の差が最少となる拘束条件の次式の最尤方程式(ML)を解くことにより推定可能となる。

$$Y = \arg \min_{\hat{h}_l(m)} \left[\sum_{n=0}^{S-1} |y_E(m, n_2) - \hat{y}_E(m, n_2)|^2 \right] \quad (2)$$

式(2)は、次式の連立方程式に帰着する。

$$\underbrace{\hat{h}_l(m)}_{S \times 1} = \underbrace{[d(m, n_2 - l)]^{-1}}_{S \times S} \cdot \underbrace{[y_E(m, n_2)]}_{S \times 1} \quad (3)$$

式(3)の逆行列は、TS 信号を要素とする行列であり受信側で既知であることから、予め計算することが出来る。これにより、シンボルごとの CIR は少ない演算量で推定可能となる。式(3)で推定されたシンボルごとの CIR に対して、図 2 に示すように、複数シンボルに亘る補間法を適用することにより時間サンプル毎の $\hat{h}_l(m, n)$ を推定可能となる。提案した CIR 推定法は、短い時間長の TS 信号を利用していることから高速移動通信環境下においても CIR の変動が小さく高精度の推定を可能としている。

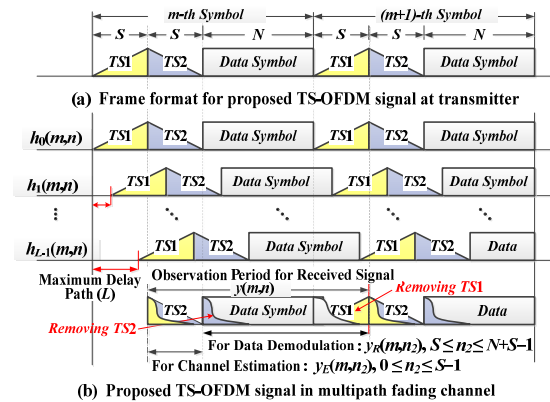


図 1 提案方式のフレーム構成

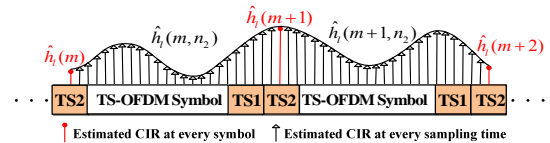


図 2 補間法を用いた時間サンプル毎の CIR 推定

(2) 帯域外輻射電力軽減法の提案

時間軸 TS 信号としては、これまでに自己相関特性に優れた PN 系列や CAZAC 系列が広く利用されている。しかしながら、これら信号はナイキストサンプルを想定した検討であり、非ナイキストサンプルの場合には自己相関特性が劣化する。また、これら信号の周波数電力スペクトラムは、ナイキストサンプルの場合には希望信号の割当帯域の外側に大きな電力輻射が発生し隣接チャネル干渉が問題となる。更に、同一パターン of TS 信号を利用した場合には、時間軸信号の繰り返しにより帯域内外に大きな電力のスプリアスが発生することが問題となる。これを解

決するために、本研究では、TS 信号として時間軸 OFDM 信号の一部を TS 信号として利用し、更に三角時間窓関数を用いた波形整形を行うことにより帯域外の輻射電力を軽減している。また、CIR 推定精度に優れた異なるデータパターンの TS 信号を予め複数個作成し、1 フレームに亘って利用することにより、同一パターンの繰り返し利用が無くなり帯域内外のスプリアス電力の軽減を可能としている。

(3) 逆行列演算量の削減を可能とする時間軸等化方式の提案

高速移動通信環境下における DFTS-OFDM 方式ならびに OFDM 方式は、ドップラー変動に起因してサブキャリア間干渉(ICI)が発生し BER 特性が大幅に劣化する。これに対して、周波数軸上の伝送路行列を用いた周波数軸等化(FDE)方式が提案されている[1-3]。FDE 方式では、伝送路行列が全ての要素が値を持つフルマトリックスとなり、等化に際しては逆行列演算が必要となり、シンボルごとの等化处理に要する演算量は $O[N^3]$ となり、非常に大きくなるという問題がある。これに対して、時間軸 CIR がシンボル内で線形的に変化すると近似し、逆行列演算をマクローニン展開を用いて求める手法や、フル行列を帯状対角行列で近似し、対角要素を並列処理により逆行列を求める手法が提案されている。これら逆行列演算の近似解法は演算量を格段に削減可能とするが、ドップラー変動が大きい高速移動通信環境下では逆行列演算の近似精度が劣化することにより BER 特性が劣化する問題があった。本研究では、これら問題を解決するために時間軸伝送路行列を用いる時間軸等化(TDE)方式を提案する。提案方式は、ML 方程式を解く際に時間軸伝送路行列を偏微分することにより完全な帯状対角行列となる特長を利用している。提案方式は、高速移動通信環境下においても、伝送路行列の逆行列を少ない演算量で完全解を求めることを可能としている。

図 3 に、提案する時間軸等化方式の送受信機構成を示す。受信側の受信データ信号 $y_R(m, n_2)$ は、次式で与えられる。

$$y_R(m, n_2) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(m, n_2) x_T(m, n_2 - l) + z(m, n_2) \quad (4)$$

$$S \leq n_2 \leq N + 2S - 1$$

但し、 $x_T(m, n_2)$ は送信された時間軸データ信号、 $z(m, n_2)$ は時間軸上での相加性白色雑音、 N はサブキャリア数を示す。式(4)の受信データ信号には、送信側で付加したデータシンボル前後の TS 信号の遅延波によりシンボル間干渉(ISI)が発生している。これら ISI は、時間サンプル毎に推定した伝送路インパルス応答 $\hat{h}_l(m, n_2)$ と受信側で既知の TS 信号を用いて除去可能となり、次式に示す受信データ信号 $y_D(m, n_2)$ を求めることが出来る。

$$y_D(m, n_2) = \begin{cases} y_R(m, n_2) - \sum_{l=n_2-S+1}^{S-1} \hat{h}_l(m, n_2) d_2(m, n_2 - l), & (S \leq n_2 \leq 2S - 2) \\ y_R(m, n_2), & (2S - 1 \leq n_2 \leq N + S - 1) \\ y_R(m, n_2) - \sum_{l=0}^{n_2-N-S} \hat{h}_l(m, n_2) d_1(m+1, n_2 - N - S - l), & (N + S \leq n_2 \leq N + 2S - 2) \end{cases} \quad (5)$$

但し、 $d_1(m, n_2)$ と $d_2(m+1, n_2)$ はデータシンボルの前後に付加された TS 信号を示す。一方、ISI を含まない受信データ信号の推定値 $\hat{y}_D(m, n_2)$ は、送信時間軸信号 $\hat{x}_T(m, n)$ を未知数とすると、推定された時間サンプルごとの $\hat{h}_l(m, n)$ を用いて次式で与えられる。

$$\hat{y}_D(m, n_2) = \begin{cases} \sum_{l=0}^{n_2-S} \hat{h}_l(m, n_2) \hat{x}(m, n_2 - S - l), & (S \leq n_2 \leq 2S - 2) \\ \sum_{l=0}^{S-1} \hat{h}_l(m, n_2) \hat{x}(m, n_2 - S - l), & (2S - 1 \leq n_2 \leq N + S - 1) \\ \sum_{l=n_2-N-S+1}^{S-1} \hat{h}_l(m, n_2) \hat{x}(m, n_2 - S - l), & (N + S \leq n_2 \leq N + 2S - 2) \end{cases} \quad (6)$$

未知数である時間軸送信信号 $\hat{x}_T(m, n_2)$ は、式(5)(6)の差が最少となる拘束条件を用いた次式の ML 方程式により推定可能となる。

$$\Gamma = \arg \min_{\hat{x}(m, n_2)} \left[\sum_{n=S}^{N+2S-2} \|y_D(m, n_2) - \hat{y}_D(m, n_2)\|^2 \right] \quad (7)$$

式(7)は、 $\hat{x}_T^*(m, n_2)$ を変数とした偏微分を行うことにより、次式に示す N 次連立方程式に帰着される。

$$[\hat{x}(m, n)]_{N \times 1} = [A_m(n_3, n)]_{N \times N}^{-1} [b(m, n_3)]_{N \times 1} \quad (8)$$

式(8)で、 $b(m, n_3)$ と $A_m(n_3, n)$ は、 $P = N + S - 1$ として、それぞれ次式で表される。

$$[b(m, n_3)]_{N \times 1} = [\hat{h}_l^H(m, n_3)]_{N \times P} [y_D(m, n_2)]_{P \times 1} \quad (9)$$

$$0 \leq n_3 \leq N - 1$$

$$[A_m(n_3, n)]_{N \times N} = [\hat{h}_l^H(m, n_3)]_{N \times P} [\hat{h}_l(m, n_2)]_{P \times N} \quad (10)$$

$$0 \leq n_3 \leq N - 1$$

式(10)より、時間軸伝送路行列 $A_m(n_3, n)$ は帯状対角行列となることが分かる。これにより、式(10)の逆行列演算量は、 $O[N^3]$ から $O[3NS^2]$ に削減可能となる。

本研究で提案した TDE 方式は、高速移動通信環境下においても、時間軸 TS 信号を用いた時間サンプル毎の高精度な CIR 推定と少ない演算量で ICI の軽減を可能としており、優れた BER 特性を達成可能とすることを特徴としている。また、提案した時間軸 TS 信号は、従来の PN 系列や CAZAC 系列を時間軸 TS 信号に利用した場合に問題となっていた大きな帯域外輻射電力を低減することも可能としている。

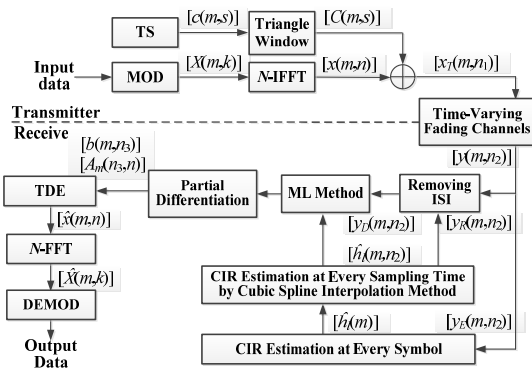


図3 提案する TDE 方式の送受信機構成

4. 研究成果

3 節で提案した時間軸 TS 信号を用いた伝送路推定法と推定された時間サンプルごとの CIR 伝送行列を用いた TDE 方式の有効性を実証するために計算機シミュレーションを実施した。

図 4 に、提案した時間軸 TS 信号を用いた場合の電力スペクトラム特性を示す。図には、比較のために従来方式である TS 信号に PN 系列を用いた場合と従来の CP-OFDM 信号の場合についても示す。図より、従来方式である PN 系列を用いた場合には大きな帯域外輻射電力が発生しているが、提案方式は従来の CP-OFDM 方式とほぼ同等の電力スペクトラム特性が達成可能であることが実証された。

図 5 には、規格化ドップラー周波数 R_D (%) を変化させた場合の提案方式の時間サンプル毎の CIR 推定精度の結果を示す。図で、 R_D (%) は移動通信環境の大きさを示すものであり、最大ドップラー周波数とサブキャリア周波数間隔との比で定義している。図より、高速移動通信環境下において、提案した時間軸 TS 信号は従来方式の PN 系列を用いた場合とほぼ同等の推定精度を達成可能であることが実証された。

図 6 には、 C/N を変化させた場合の提案 TDE 方式の BER 特性を示す。図には、従来方式である 3 種類の FDE 方式の BER 特性も示す[1-3]。図より、提案方式は高速移動通信環境下において従来方式である FDE 方式と比較して BER 特性を大幅に改善可能となることが実証された。

図 7 には、データサブキャリア数 N を変化させた場合の提案方式と従来方式[1-3]の復調処理に要する演算量の計算結果を示す。図より、提案方式は従来方式と比較して所要演算量が若干大きいことが分かる。しかしながら、従来方式の演算量の削減は図 6 の結果より明らかなように、BER 特性の大幅な劣化を犠牲にしたものであることが分かる。

本研究では、DFTS-OFDM と OFDM 方式で問題となっていた高速移動通信環境下における高精度伝送路推定法と ICI 軽減を可能とする等化方式を提案しており、将来のマルチメディア無線通信サービスの実現に際して有効に活用されることが期待される。

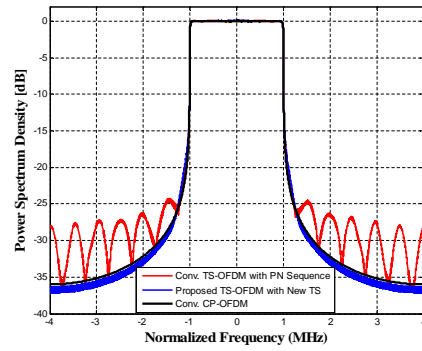


図4 提案方式の電力スペクトラム特性

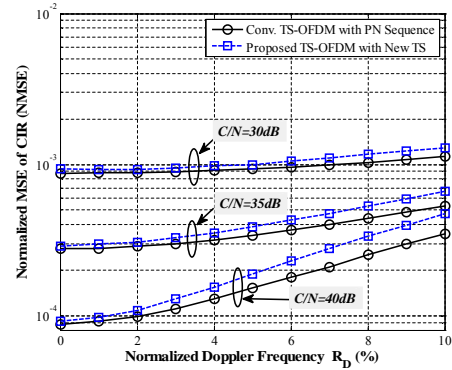


図5 提案方式の時間サンプル毎の CIR 推定精度

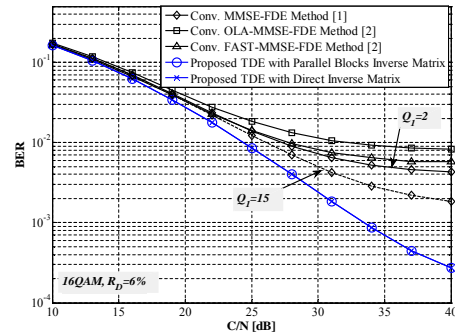


図6 提案方式の C/N 対 BER 特性

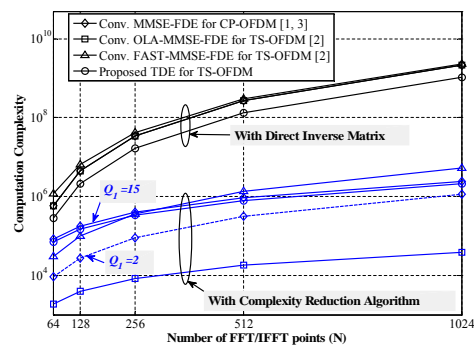


図7 提案方式と従来方式の所要演算量

参考文献

- [1] L. Rugini, P. Banelli, and G. Leus, Simple equalization of time-varying channels for OFDM, *IEEE Comm. Letters*, vol. 9, 2005, 619–621.
- [2] J. Hao, J. Wang, and Y. Wu, A New Equalizer in Doubly-Selective Channels for TDS-OFDM, *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 61, no. 1, 2015, 91–97.
- [3] Y. S. Choi, P. J. Volts, and F. A. Cassara, On channel estimation and detection for multicarrier signals in fast and selective Rayleigh fading channels, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 8, 2001, 1375–1387.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 22 件)

Tanairat Mata, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Proposal of Channel Estimation Method for Wireless Two-way Relay System of using SFBC MIMO-OFDM, Technique, 査読有り, Journal of Springer Telecommunication Systems, Vol.3, 2016, 1-13.

Tanairat Mata, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Proposal of Time Domain Channel Estimation Method for MIMO-OFDM Systems, 査読有り, in Proc. of 7th EAI International Conference on Wireless and Satellite Systems (WiSATS), CD-ROM, 2015, 1-14.

安藤宏泰, 宝来美緒, 森香津夫, 小林英雄, 非線形増幅器の入出力特性推定法を用いた OFDM 信号の非線形ひずみ補償方式の検討, 査読有り, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J98-B, No.6, 2015, 1-6.

Pongsathorn Reangsuntea, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Time Domain Equalization Method for DFTS-OFDM Signal without GI under Highly Mobile Environments, 査読有り, ECTI Transaction on Computer and Information Technology, Vol.9, No.2, 2015, 150-159.

Pongsathorn Reangsuntea, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Iterative based ML Demodulation Method for OFDM Signal under Higher Mobile Environments, 査読有り, in Proc. of the 81st IEEE on vehicular technology conference (VTC-Spring), CD-ROM, 2015, 1-6.

Tanairat Mata, Mio Hourai, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Time Domain Channel Estimation Method for Uplink OFDMA System, 査読有り, in Proc. of the 22nd IEEE International Conference on Telecommunications (ICT2015), CD-ROM, 2015, 363-367.

Pongsathorn Reangsuntea, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Iterative Based Time Domain Equalization Method for OFDM Signal under High Mobile Environments, 査読有り, in Proc. of the 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), CD-ROM, 2014, 5 pages.

Mio Horai, Hideo Kobayashi and Takashi G. Nitta, Chirp Signal Transform and Its Properties, 査読有り, Journal of Applied Mathematics, Vol. 2014, Article ID 161989, 2014, 9 pages.

Naoto Kitajima, Katsuhiko Naito, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Decision Aided ML Channel Estimation Method for OFDM in High Time-varying Fading Channel, 査読有り, in Proc. of the 11th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), CD-ROM, 2014, 5pages.

Tanairat Mata, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Channel Estimation Method for SFBC MIMO-OFDM Based Wireless Two-Way Relay System in Time-Varying Fading Channel, 査読有り, in Proc. of the 5th IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICCE), CD-ROM, 2014, 71-76.

Tanairat Mata, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Proposal of Channel Estimation Method for ITS System by using STBC MIMO-OFDM, 査読有り, ECTI Transaction on Computer and Information Technology, Vol.8, No.1, 2014, 36-44.

Tanairat Mata, Katsuhiko Naito, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Proposal of Channel Estimation Method for Bi-directional OFDM Based ANC in Higher Time-varying Fading Channel, 査読有り, in Proc. of the 79th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), CD-ROM, 2014, 1-5.

〔学会発表〕(計 8 件)

Hideo Kobayashi, Fundamentals and Its Applications of OFDM Technology, 招待講演, International Conference on Engineering Technology (ICET2013), Dec. 12-13, 2013 Bali (Indonesia).

〔図書〕(計 1 件)

Tanairat Mata, Pisit Boonsrimuang, Kazuo Mori and Hideo Kobayashi, Wireless and Satellite Systems, Springer, 2016, 402 (215-228).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.com.elec.mie-u.ac.jp/>

(電気電子工学専攻通信工学研究室)

<http://www.crc.mie-u.ac.jp/seeds/>

(三重大学全学シーズ集)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

小林 英雄 (KOBAYASHI HIDEO)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 60303749