

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22410

研究課題名（和文）Faster-than-Nyquist伝送と最適電力配分による高速無線通信の検討

研究課題名（英文）Faster-than-Nyquist signaling with power allocation in frequency-selective fading channel

研究代表者

石原 拓実 (Ishihara, Takumi)

東京大学・生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：60881513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実用的なroot raised cosine (RRC) 帯域制限フィルタを使用したときに従来のナイキスト基準伝送を上回る周波数利用効率を達成しうるfaster-than-Nyquist (FTN) 伝送方式の送受信機設計に関する検討を行った。具体的には、広帯域フェージング伝搬路を対象としてFTN伝送のための電力配分方式を提案し、実用的RRCフィルタを用いたときに、理想的な矩形の帯域制限フィルタを用いた場合の周波数利用効率の上限に迫る性能を達成可能なFTN伝送方式を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、faster-than-Nyquist (FTN) 信号のシンボル電力係数を適切に制御することにより、広帯域フェージング伝搬路において、実用的なroot raised cosine (RRC) 帯域制限フィルタを用いながら、理想的な矩形の帯域制限フィルタを用いた場合に迫る周波数利用効率を達成可能になることを初めて理論解析および数値解析の両面から示すものである。FTN伝送は原理上多様な通信シナリオに適用可能であるため、情報通信分野の様々な領域に本研究成果を応用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a novel faster-than-Nyquist (FTN) signaling transceiver, where FTN signaling is a non-orthogonal information transmission scheme that is capable of achieving a higher spectral efficiency than conventional Nyquist signaling when the same root-raised cosine (RRC) shaping filter is employed. More specifically, we proposed FTN signaling with power allocation in a frequency-selective fading channel. Our proposed FTN signaling transceiver employing an RRC shaping filter is capable of achieving a spectral efficiency close to the ideal rectangular-filter-based upper bound.

研究分野：通信工学

キーワード：FTN伝送 ナイキスト基準 電力配分 広帯域フェージング伝搬路

1. 研究開始当初の背景

無線通信に使用される周波数が逼迫しつつあるため、将来の無線通信システムでは有限の周波数リソースをより効率的に使用することが求められる。既存の多くの無線システムでは、送信信号間で干渉を発生させないために、ナイキスト基準によって送信信号の最小間隔がシステムの周波数帯域幅から一意に決定される。しかしながら、このナイキスト基準に従った信号伝送では、実用的な root raised cosine (RRC) 帯域制限フィルタを使用したときに、理想的な矩形の帯域制限フィルタと比較して超過帯域の分だけ周波数利用効率が低下するという欠点が存在する。近年この問題の解決策として、faster-than-Nyquist (FTN) 信号伝送方式が注目されている [1]。FTN 伝送ではナイキスト基準が定める最小間隔よりも短い間隔で信号を送信する。これにより、実用的な RRC フィルタを使用したときに、従来のナイキスト伝送よりも高速な通信を実現できる可能性がある。しかしながら、FTN 伝送ではナイキスト基準を無視することにより生じる信号間干渉が受信性能を劣化させる。この干渉の影響の補償が高速 FTN 伝送実現のための最重要課題であり、これまでに様々な FTN 送受信機的设计方針が提案されてきた。特に、加法性白色雑音 (additive white Gaussian noise; AWGN) 伝搬路における FTN 伝送の相互情報量を最大化するシンボル電力係数最適化方式を適用した場合は、実用的な RRC フィルタを用いた場合でも、理想矩形フィルタと同等の周波数利用効率を達成できる [2]。しかしながら、同方式 [2] をより現実的な広帯域フェージング伝搬路に拡張した検討は行われていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広帯域フェージング伝搬路を対象として、実用的な RRC フィルタを用いながら理想矩形フィルタに匹敵する周波数利用効率を達成可能な FTN 伝送システムを確立することである。具体的には、下記の研究 および研究 をそれぞれ初年度および最終年度に実施する。研究 : 広帯域フェージング伝搬路を対象として FTN 伝送の相互情報量を最大化する最適なシンボル電力係数を導出する。これにより、広帯域フェージング伝搬路においても、実用的な RRC フィルタを用いながら理想矩形フィルタに迫る周波数利用効率を達成できることを示す。研究 : 研究 で提案する FTN 伝送システムではシンボル電力係数の最適化に膨大な演算量を必要とするため、リアルタイムで動作することが困難である。そこで、研究 の最適電力配分処理を低演算量化することにより、リアルタイム動作が可能な送受信演算量を維持しつつ、最適な電力配分を行った際の性能を漸近的に達成可能な FTN 伝送システムを確立する。

3. 研究の方法

2. で述べた研究 および研究 の具体的な実施方法を下記に述べる。

研究 : まず、広帯域フェージング伝搬路において FTN 伝送が達成しうる相互情報量を、情報理論解析フレームワークに基づいて導出する。この導出過程において、実用的な RRC フィルタを用いたときに、FTN 伝送特有の干渉および広帯域伝搬路の特性が送受信信号にもたらす影響を考慮しながらシンボル電力係数を最適化することにより、最適化しない場合と比較して高い周波数利用効率を達成できる可能性があることを示す。これを踏まえ、まずは必要となる演算量の多寡を考慮せずに、FTN 伝送の相互情報量を最大化する最適なシンボル電力係数を導出する。これにより、広帯域フェージング伝搬路においても、実用的な RRC フィルタを用いたときに理想矩形フィルタに漸近する周波数利用効率を達成できることを情報理論的観点から示す。さらに、信号検出の誤り率を数値シミュレーションで評価することにより、RRC フィルタを用いた提案 FTN 伝送システムが理想矩形フィルタに漸近する性能を達成できることを数値解析の観点からも明らかにする。

研究 : 研究 で提案する電力配分方式では、FTN 伝送特有の干渉行列の固有値をリアルタイムに計算する必要があるため、演算量が膨大になる(計算量のオーダーは $O(N^3)$)。そこで、FTN 伝送特有の干渉行列を巡回行列で近似することにより、固有値計算の低演算量化を図る。具体的には、送信信号にサイクリックプレフィックスと呼ばれる冗長シンボルを付加することにより、FTN 伝送特有の干渉行列を巡回行列で近似する。これにより、干渉行列の固有値を高速フーリエ変換に基づいて高速に計算することが可能になり、電力配分の計算に必要な演算量を大幅に削減できる(計算量のオーダーは $O(N \log_2 N)$)。信号検出誤り率の数値シミュレーションにより、提案 FTN 伝送システムが少ない演算量で最適な電力配分を行った場合に漸近する性能を達成できることを示す。

[1] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," The Bell Syst. Tech. Jour. 1975.

[2] T. Ishihara and S. Sugiura, "The evolution of faster-than-Nyquist signaling," IEEE Access, 2021.

4. 研究成果

研究：本研究では、広帯域フェージング伝搬路における FTN 伝送の相互情報量を最大化する最適電力配分方式を提案した。関連成果をまとめた論文 IEEE ジャーナルに採録された [3]。具体的には、まず広帯域フェージング伝搬路において N 個の情報シンボルを FTN 伝送した際の相互情報量

$$\sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_s^2}{N_0} \gamma_k \xi_k \right) \quad (1)$$

を導出した [3, Eq. (55)]。ここで、 σ_s は送信シンボルの分散、 N_0 は雑音電力、 ξ_k は等価 FTN 干渉行列の固有値、 γ_k はシンボル電力係数である。3. で述べたように、 ξ_k は計算量オーダー $O(N^3)$ の固有値分解によって計算される。また、式(1)は RRC フィルタのロールオフ率を β としたとき、FTN 伝送の信号パッキング率が $\tau \geq 1/(1+\beta)$ のとき成り立つ。ラグランジュの未定乗数法に基づいて式(1)を最大化するシンボル電力係数を求めると、

$$\gamma_k = \max \left(\frac{1}{\alpha \phi_k \ln 2} - \frac{N_0}{\xi_k \sigma_s^2}, 0 \right) \quad (2)$$

となる [3, Eq. (67)]。ここで、 α はラグランジュ乗数、 ϕ_k は送信連続時間信号のエネルギーが最適化の前後で変わらないようにするための係数である。式(2)は注水定理の原理に基づいて計算できる [4]。

図1は、タップ数 $L = 20$ の周波数選択性レイリーフェージング伝搬路を仮定し、 $N = 1000$ としたとき、式(2)に基づいて電力係数を最適化したときの周波数利用効率をプロットしたものである。 L 個の伝搬路係数は平均 0、分散 $1/L$ の複素ガウス分布に従って生成した。また、RRC フィルタのロールオフ率は $\beta = 0.25$ とし、FTN 伝送の信号パッキング率を $\tau = 1, 0.9, 0.8$ とした。比較のため、理想矩形フィルタ ($\beta = 0$) を仮定としたときの周波数利用効率の上限値もプロットした。図1に示した通り、従来のナイキスト基準伝送 ($\tau = 1$) では、RRC フィルタ ($\beta = 0.25$) を用いたときに、理想矩形フィルタを仮定した場合と比較して性能ロスが生じている。一方で、提案 FTN 伝送は、 $\tau = 0.8$ のとき、RRC フィルタを用いながら理想矩形フィルタを仮定した上限値に漸近する周波数利用効率を達成できていることがわかる。

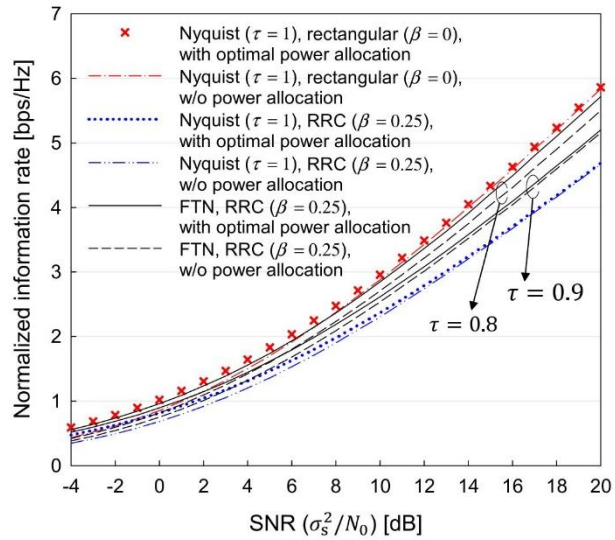


図1 提案 FTN 伝送の周波数利用効率
(出典：[3]の Fig. 2)

研究：本研究では、FTN 干渉行列を巡回行列で近似することにより、電力係数計算にかかる演算コストを大幅に削減した FTN 伝送技術を提案した。関連成果をまとめた論文が IEEE ジャーナルに採録された [5]。具体的には、 N 個の情報シンボル系列に対して、先頭の 2ν 個のシンボルを末尾にコピーし (サイクリックプレフィックスの付加) 受信シンボル列から先頭と末尾の ν 個のシンボルを削除することにより、 N 個の受信シンボル系列 $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_{N-1}]^T$ は

$$\mathbf{r} \simeq \mathbf{G}_c \mathbf{x} + \boldsymbol{\eta} \quad (3)$$

と近似される [5, Eq. (27)]。 \mathbf{x} と $\boldsymbol{\eta}$ はそれぞれ N 個の情報シンボルおよび雑音サンプルである。また、干渉行列 \mathbf{G}_c は巡回行列となっており、 $\mathbf{G}_c = \mathbf{Q}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{Q}$ と固有値分解される。ここで、 \mathbf{Q} は正規化離散フーリエ変換行列である。また、 $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}\{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}\}$ は対角成分に固有値を持つ対角行列であり、固有値 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}$ は \mathbf{G}_c の第一列成分を高速フーリエ変換することにより簡単に計算できる。これにより、固有値計算に必要な計算量のオーダーを研究の $O(N^3)$ から $O(N \log_2 N)$ に大きく削減できる。さらに、雑音サンプル $\boldsymbol{\eta}$ の相関行列も巡回行列で近似できることを利用すると、提案 FTN 伝送システムの広帯域フェージング伝搬路における相互情報量は

$$\sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_s^2}{N_0} \gamma_k \theta_k^2 \psi_k^{-1} \right) \quad (4)$$

のように近似計算できる [5, Eq. (48)]. ここで、 ψ_k は近似した巡回雑音相関行列の固有値である。研究 と同様に、送信連続時間信号のエネルギーが一定であるという制約のもとで、ラグランジュの未定乗数法により式(4)を最大化する γ_k を求めると、

$$\gamma_k = \max\left(\frac{1}{\alpha\phi_k \ln 2} - \frac{\psi_k N_0}{\theta_k^2 \sigma_s^2}, 0\right) \quad (5)$$

となる。

図 2 に、図 1 と同様の伝搬路で、 $N = 1024$ および $\nu = 30$ とし、ターボ符号を適用した提案 FTN 伝送の bit error ratio (BER) を示した。図 2 に示した通り、提案 FTN 伝送システムは電力係数計算の演算コストを大幅に削減しながら、研究 の最適な FTN 伝送システムに近い BER 性能を達成できていることが確認できる。

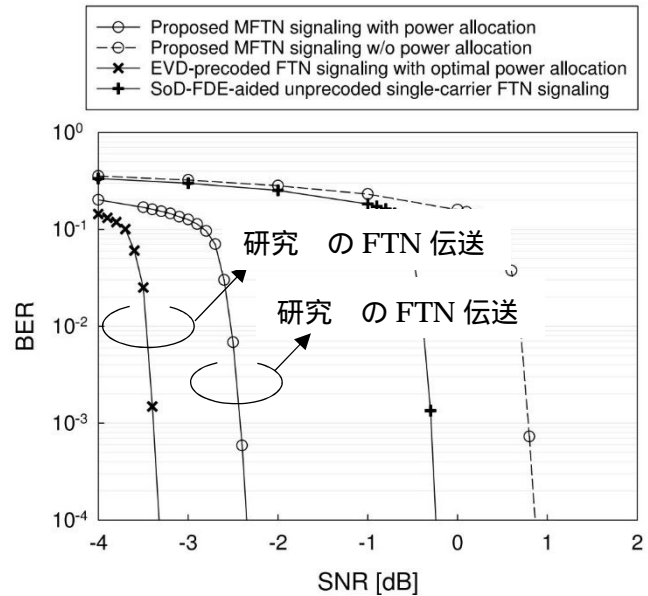


図 2 BER の比較

(出典 : [5] の FIGURE 6)

- [3] T. Ishihara and S. Sugiura, "Eigendecomposition-Precoded Faster-Than-Nyquist Signaling With Optimal Power Allocation in Frequency-Selective Fading Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 1681-1693, Mar. 2022.
- [4] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005.
- [5] T. Ishihara and S. Sugiura, "Reduced-Complexity FFT-Spread Multicarrier Faster-Than-Nyquist Signaling in Frequency-Selective Fading Channel," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 530-542, Mar. 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ishihara Takumi, Sugiura Shinya	4. 巻 3
2. 論文標題 Reduced-Complexity FFT-Spread Multicarrier Faster-Than-Nyquist Signaling in Frequency-Selective Fading Channel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of the Communications Society	6. 最初と最後の頁 530 ~ 542
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/OJCOMS.2022.3160721	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishihara Takumi, Sugiura Shinya	4. 巻 21
2. 論文標題 Eigendecomposition-Precoded Faster-Than-Nyquist Signaling With Optimal Power Allocation in Frequency-Selective Fading Channels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 1681 ~ 1693
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TWC.2021.3106098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishihara Takumi, Sugiura Shinya, Hanzo Lajos	4. 巻 9
2. 論文標題 The Evolution of Faster-Than-Nyquist Signaling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 86535 ~ 86564
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3088997	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takumi Ishihara
2. 発表標題 Precoded faster-than-Nyquist signaling with optimal power allocation in frequency-selective channel
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications Workshops（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Ishihara
2. 発表標題 FFT-spread faster-than-Nyquist signaling in frequency-selective fading channel
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
英国	University of Southampton		