

令和 3 年 4 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18871

研究課題名（和文）ナイキスト基準の限界を超える高速無線伝送のための送信信号設計指針の確立

研究課題名（英文）Design guideline of transmit signal for high-speed wireless transmission beyond the Nyquist criterion limit

研究代表者

杉浦 慎哉（Sugiura, Shinya）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30394927

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：ワイヤレス通信の分野では利用しやすい周波数帯域が逼迫しており、物理層において高い性能を実現することがますます重要になってきている。本研究ではナイキスト基準の限界を超える通信である faster-than-Nyquist (FTN) 信号伝送を対象として、送信シンボルとその電力制御の設計指針を示した。特に、固有値分解に基づいてFTN特有のシンボル間干渉の影響を除去し、相互情報量を導出することで、最適な電力配分を求めた。結果として、同じルートレイズドコサインフィルタを用いたナイキスト基準に基づく信号伝送方式と比べた場合に、ロールオフ率の分だけ高い周波数利用効率を実現できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ナイキスト基準の限界を超える通信である faster-than-Nyquist (FTN) 信号伝送を対象として、情報理論の観点から得られうる利得の上限を明らかにした。このことは、さらなる高周波数利用効率が重要である次世代ワイヤレス通信システムへの適用検討に重要である。今回対象とした信号伝送方式は基本的な技術であるため、実用化時には幅広い通信システムへの波及効果が期待できる。引き続き、本技術の実用化に向けた研究に取り組んでいく。

研究成果の概要（英文）：In wireless communications, the available frequency bandwidth is becoming scarce, and it is becoming increasingly important to achieve high performance in the physical layer. In this study, we present a design guideline for transmitting symbols in faster-than-Nyquist (FTN) signaling, as well as their power control. In particular, based on eigenvalue decomposition, the effect of inter-symbol interference peculiar to FTN is removed, and the mutual information content is derived to obtain the optimal power allocation. As a result, it is shown that a higher bandwidth efficiency can be achieved by the proposed FTN signaling scheme than the Nyquist-criterion counterpart, having the same root-raised cosine filter.

研究分野：ワイヤレス通信

キーワード：faster-than-Nyquist信号伝送 電力制御 伝送容量 変復調

1. 研究開始当初の背景

実用化されている無線通信システムはナイキスト基準で定義されるシンボルレート上限に従っており、通信回線大容量化および高速化のためには追加の周波数帯域の確保が重要となる。しかしながら、無線通信に適した周波数帯域は需要の急速の増加とともに枯渇しつつあり、将来の高速大容量の無線アプリケーション実現には大きな壁となっている。1960~1970年代に、利用する周波数帯域を増やすことなくナイキスト基準のシンボルレート限界を超える高速信号伝送を可能とする faster-than-Nyquist (FTN) 信号伝送のコンセプトが提案された[1]。しかしながら、受信機における干渉信号除去に必要な演算量が現実的ではなく、長く研究が進められなかった。その後 2000 年代に入ってから、コンピュータの処理能力向上に伴い、再び FTN 技術が注目を集め、主に低演算量 FTN 受信機の研究が進められてきた[2]。一方、FTN 信号伝送のための送信フィルタやパイロットシンボルなどを含む送信シンボルについては、従来のナイキスト基準のシステムと同様の思想で設計されており、FTN 信号伝送のポテンシャルが最大限に活かされていない。

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では FTN シンボルの設計指針を示すことを目的としている。また、FTN 信号伝送による情報理論的上限を示し、得られる利得の上限を明らかにする。

3. 研究の方法

上記目的を達成する手法として、FTN 特有のシンボル間干渉の影響を表す干渉行列を固有値分解することで、FTN 信号を干渉のないサブストリームに分解をする。さらに、FTN 受信機特有の相関性雑音の影響を白色化する。これにより、従来のナイキスト基準の信号伝送で用いられてきた用いられてきた情報理論的解析手法を直接適用することが可能となる。さらに、FTN システムの相互情報量を最大化するような最適電力配分を導出する。数値解析により、FTN 伝送で得られる周波数利用効率の利得を明らかにする。

4. 研究成果

(1) システムモデル

FTN 信号伝送では、ナイキスト第一基準によるシンボル間隔 T_0 よりも小さいシンボル間隔 $T = \tau T_0$ でシンボルを送信する。ここで、 τ ($0 < \tau \leq 1$)はシンボルパッキング率である。簡単のため、まず加法的白色ガウス雑音 (additive white Gaussian noise: AWGN) 伝搬路を考える。変調された N 個の複素情報シンボル $\mathbf{s} = [s_0, \dots, s_{N-1}]^T$ を送信機から受信機へブロック伝送することを考える。正方複素プリコーディング行列 \mathbf{P} により、情報シンボル \mathbf{s} を N 個の複素シンボル $\mathbf{x} = [x_0, \dots, x_{N-1}]^T = \mathbf{P}\mathbf{s}$ に変換し、シンボル間隔 T でシングルキャリア伝送する。ここで、複素情報シンボル列 \mathbf{s} は平均エネルギー $\mathbb{E}[|s_k|^2] = E_s$ を持つものとする。また、帯域制限フィルタとして、インパルス応答 $h(t)$ で表され、周波数帯域幅が $2W(1 + \beta)$ となるルートレイズドコサイン (root raised cosine: RRC) フィルタを用いる。ここで、 β はロールオフ率を表す。このとき、送受信機全体のインパルス応答は $g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi)h(t - \xi)d\xi$ となる。したがって、受信 FTN 信号ブロックは以下で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= [y_0, \dots, y_{N-1}]^T \\ &= \mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{G} は第一列ベクトルが $[g(0), g(T), \dots, g((N-1)T)]^T$ で与えられるテプリッツ行列となる。また、 \mathbf{n} は相関行列が $\mathbb{E}[\mathbf{nn}^H] = N_0\mathbf{G}$ となる有相関雑音である。 N_0 は雑音のスペクトル密度を表す。干渉行列 \mathbf{G} は、直交行列 \mathbf{U} と対角行列 $\mathbf{\Lambda}$ により $\mathbf{G} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T$ と固有値分解できる。 $\mathbf{\Lambda}$ は対角成分に降順の固有値 $\mathbf{s} = [\lambda_0, \dots, \lambda_{N-1}]$ を持つものとする。したがって、プリコーディング行列を $\mathbf{P} = \mathbf{U}$ で与え、受信ブロックに \mathbf{U}^T を乗算すると、式(1)は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' &= [y'_0, \dots, y'_{N-1}]^T \\ &= \mathbf{U}^T\mathbf{y} = \mathbf{\Lambda}\mathbf{s} + \mathbf{U}^T\mathbf{n} \end{aligned} \quad (2)$$

このとき、 $\mathbf{\Lambda}$ は対角行列であるため、 y'_k と s_k は一对一の関係で与えられ、干渉の影響が除去されている。また、雑音項の相関行列は $\mathbb{E}[\mathbf{U}^T\mathbf{nn}^H\mathbf{U}] = N_0\mathbf{\Lambda}$ で与えられ、各要素間で無相関である。なお、固有値 λ_k ($k = 0, \dots, N-1$)は、シンボルパッキング率が $\tau \geq 1/(1 + \beta)$ の範囲にあるとき N の値に関係なく $\lambda_k > 0$ である[3]。本研究では、常に $\tau \geq 1/(1 + \beta)$ を仮定する。

(2) 相互情報量最大化と通信路容量

提案方式では、FTN 信号の相互情報量を目的関数としてプリコーディング行列 \mathbf{P} を最適化する。

特に、送信信号ブロックのトータルエネルギーが一定であることを制約条件として、ラグランジュ未定乗数法を用いて、(2)から相互情報量を最大化するプリコーディング行列は以下で与えられる[4]。

$$\mathbf{P} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}^{-1/2} \quad (3)$$

このとき、通信路容量は

$$C = (2W/\tau) \log_2(1 + E_s/N_0) \text{ for } \tau \geq 1/(1 + \beta) \quad (4)$$

となる。

(3) 数値解析結果

図1に、提案手法の通信路容量(4)を帯域 $2W(1 + \beta)$ で正規化した周波数利用効率を示す。ここで、 $\beta = 0.25$, $\tau = 0.9, 0.8$ とした。比較のため、理想的な矩形フィルタ($\beta = 0$)および $\beta = 0.25$ のRRCフィルタを用いたナイキスト基準伝送($\tau = 1$)の周波数利用効率をプロットした。図1から、提案手法の性能はシンボルパッキング率 τ を小さくすると、周波数利用効率が向上することがわかる。特に、 $\tau = 0.8$ のとき、理想的な矩形フィルタを用いた性能限界と同等の性能を達成していることがわかる。一方、提案方式と同じRRCフィルタを用いたナイキスト基準伝送では、提案方式($\tau = 0.8$)と比べて超過帯域(ロールオフ率) $\beta = 0.25$ の分だけ性能が劣っている。これにより、FTN伝送では超過帯域幅を有効に活用できていることがわかる。

次に、より一般的な周波数選択性フェージング伝搬路を対象として性能評価を行った。提案方式の最適電力配分に一部変更を加えた[5]。図2に、周波数利用効率を示す。パラメータは図1で用いたものと同じとした。加えて、電力制御を行わない場合もプロットした。図2より、提案方式は、同じロールオフ率のRRCフィルタを用いるナイキスト基準伝送よりも高い周波数利用効率を得られることを確認した。また、理想的な矩形フィルタを用いるナイキスト基準に基づく信号伝送に近い性能が得られることがわかった。

なお、周波数選択性フェージング環境下においては、伝搬路の相関時間ごとに電力配分の係数を計算する必要があるため、高速フェージング環境下においては高い演算量が課題となる。演算量の低減が今後の課題である。

<引用文献>

- [1] J. B. Anderson, F. Rusek and V. Öwall, "Faster-Than-Nyquist Signaling," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 8, pp. 1817-1830, Aug. 2013.
- [2] A. D. Liveris and C. N. Georghiades, "Exploiting faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 9, pp. 1502-1511, Sept. 2003.
- [3] Y. D. J. Kim, "Properties of faster-than-Nyquist channel matrices and folded-spectrum, and their applications," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Apr. 2016, pp. 1-7.
- [4] T. Ishihara and S. Sugiura, "SVD-precoded faster-than-Nyquist signaling with optimal and truncated power allocation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 12, pp. 5909-5923, Dec. 2019.
- [5] T. Ishihara and S. Sugiura, "Precoded faster-than-Nyquist signaling with optimal power allocation in frequency-selective channel," *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Virtual Conference, 14-23 June 2021. (<http://dx.doi.org/10.36227/techrxiv.14315093.v1>)

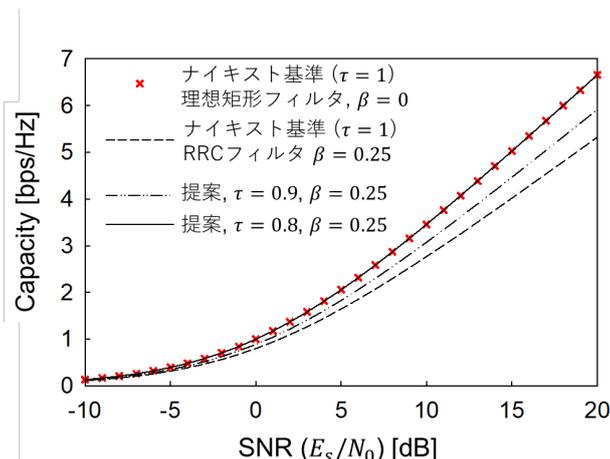


図1. 通信路容量 (AWGN 伝搬路)

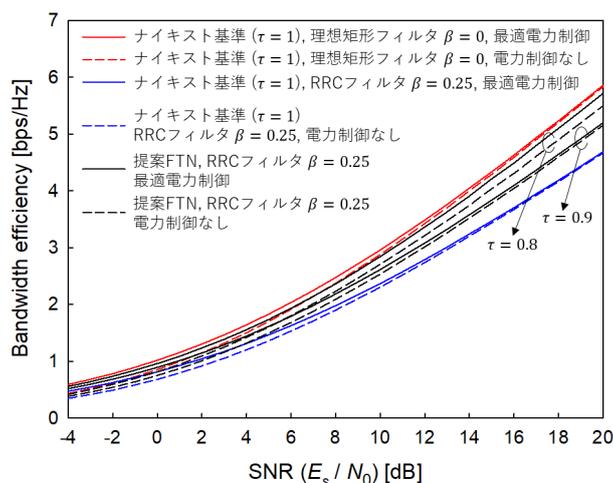


図2. 通信路容量 (周波数選択性フェージング伝搬路) © IEEE. T. Ishihara and S. Sugiura [5].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 S. Sugiura	4. 巻 20
2. 論文標題 Secrecy performance of eigendecomposition-based FTN signaling and NOFDM in quasi-static fading channel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2021.3070891	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 Masaki Keita, Ishihara Takumi, Sugiura Shinya	4. 巻 8
2. 論文標題 Tradeoff Between Calculation Precision and Information Rate in Eigendecomposition-Based Faster-Than-Nyquist Signaling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 223461 ~ 223471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3043244	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 Osaki Seichiroh, Ishihara Takumi, Sugiura Shinya	4. 巻 19
2. 論文標題 Eigenvalue-Decomposition-Precoded Ultra-Dense Non-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 8165 ~ 8178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2020.3019664	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 T. Ishihara and S. Sugiura	4. 巻 18
2. 論文標題 SVD-Precoded Faster-Than-Nyquist Signaling With Optimal and Truncated Power Allocation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 5909 ~ 5923
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2019.2940632	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 S. Osaki, M. Nakao, T. Ishihara, and S. Sugiura	4. 巻 26
2. 論文標題 Differentially Modulated Spectrally Efficient Frequency-Division Multiplexing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Signal Processing Letters	6. 最初と最後の頁 1046 ~ 1050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LSP.2019.2918688	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 Nakao Miyu, Sugiura Shinya	4. 巻 8
2. 論文標題 Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing With Index-Modulated Non-Orthogonal Subcarriers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 233 ~ 236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2018.2867869	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 Sagayama Chie, Ishihara Takumi, Sugiura Shinya	4. 巻 26
2. 論文標題 Performance Analysis and Constellation Optimization of Star-QAM-Aided Differential Faster-Than-Nyquist Signaling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Signal Processing Letters	6. 最初と最後の頁 144 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LSP.2018.2882696	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 T. Ishihara and S. Sugiura	4. 巻 6
2. 論文標題 Differential faster-than-Nyquist signaling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 4199-4206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2800002	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 T. Ishihara and S. Sugiura	4. 巻 6
2. 論文標題 Faster-than-Nyquist signaling with index modulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 630-633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2017.2724517	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 S. Sugiura, T. Ishihara, and M. Nakao	4. 巻 5
2. 論文標題 State-of-the-art design of index modulation in the space, time, and frequency domains: Benefits and fundamental limitations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 21774-21790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2017.2763978	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 -

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 T. Ishihara and S. Sugiura
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 石原拓実、杉浦慎哉
2. 発表標題 固有値分解を利用したFTN伝送のプリコーディングと相互情報量の最大化
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Osaki, T. Ishihara, and S. Sugiura
2 . 発表標題 Non-orthogonal frequency-division multiplexing based on eigenvalue decomposition
3 . 学会等名 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Masaki, T. Ishihara, and S. Sugiura
2 . 発表標題 Effects of eigenvalue distribution on precoded faster-than-Nyquist signaling with power allocation
3 . 学会等名 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Ishihara and S. Sugiura
2 . 発表標題 Optimal and suboptimal power allocation for SVD-precoded faster-than-Nyquist signaling
3 . 学会等名 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Ishihara and S. Sugiura
2 . 発表標題 Faster-than-Nyquist signaling with differential encoding and noncoherent detection
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 石原拓実, 杉浦慎哉
2. 発表標題 Faster-than-Nyquist信号の差動符号化と非同期検出
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

杉浦研究室ホームページ http://sgurlab.iis.u-tokyo.ac.jp/

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
---------	---------