

直交時間周波数空間（OTFS）変調の最新研究動向

實松, 豊
九州大学

<https://hdl.handle.net/2324/7409205>

出版情報：電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp. SS-14-SS-17, 2026-02-24. 電子情報通信学会
バージョン：
権利関係：Copyright © 2026 IEICE



直交時間周波数空間 (OTFS) 変調の最新研究動向

Recent Advances in Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation

實松 豊

Yutaka Jitsumatsu

九州大学

Kyushu University

1 はじめに

直交時間周波数空間 (Orthogonal Time Frequency Space: OTFS) 変調は、時間および周波数の両方に選択性を有する、いわゆる二重選択性フェージング環境を対象として提案された変調方式である。従来の OFDM では、チャンネルの時間変動に起因する直交性の崩れによりサブキャリア間干渉が生じ、特にドップラー広がり (Doppler Spread) が大きい環境において通信性能が劣化することが知られている。この問題に対し、OFDM においても、基底展開モデル (Basis Expansion Model: BEM) などを用いて時間変動チャンネルを低次元で近似し、受信側で干渉を抑制する手法が提案されている。

一方、OTFS では、情報シンボルを遅延-ドップラー領域に配置し、時間-周波数領域との間で 2 次元変換を行うことにより、移動通信環境におけるマルチパスチャンネルを、準定常かつ疎な構造として表現できる点に特徴がある。この表現に基づき、二重選択性フェージング環境におけるチャンネル推定および等化を、遅延-ドップラー領域の構造を利用した形で定式化できることが、多くの研究により示されている。これらの特性から、OTFS は高速移動環境における通信方式として有望であると報告されている。

さらに、遅延-ドップラー領域を用いる信号表現により、各マルチパス成分に対応する遅延およびドップラー周波数の推定問題を自然に定式化できることから、センシングと通信の融合 (Integrated Sensing and Communications: ISAC) への応用可能性についても近年注目されている。OTFS が学術論文として初めて公表されたのは、2017 年の IEEE WCNC における Hadani らの発表 [1] であるが、関連する特許はそれ以前に取得されている。本論文では、諸外国の大学および企業における研究動向、プレスリリース、ならびに IEEE における関連活動を整理し、2025 年 12 月現在における OTFS 研究および開発の最新状況を概観する。

2 最近の研究動向

2.1 国際会議におけるワークショップ

過去に行われた IEEE における OTFS に関するワークショップ、特別セッションを列挙する。

- ICC (International Conference on Communications): 2021 の 1st Workshop on OTFS 以降、2025 年まで毎年開催
- ICC (IEEE/CIC International Conference on Communications in China) においても OTFS の

ワークショップ開催が確認できる。Workshop on Orthogonal Time Frequency Space Modulation (OTFS) for Reliable High-Mobility Communications (2021, 2023), Workshop on OTFS and its Two-Dimensional Modulation Extensions for High-Mobility Communications (2022), Workshop on Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation and Delay-Doppler Waveforms for Communications and Sensing (2024, 2025)

- WCNC では、Workshop on Delay-Doppler Communications, Sensing, and Their Integration を 2023 年、2024 年、2025 年にそれぞれ第 1 回から第 3 回が開催された。
- Globecom: 2025 年に、The 4th Workshop on Delay-Doppler Communications, Sensing, and Their Integration が開催された。WCNC2026 の workshop のリストには名前がないことから、同名のワークショップは、WCNC から Globecom に移動したと考えられる。
- PIMRC: Workshop on OTFS and Detection Techniques が 2025 年に開催された

以上のように IEEE Communication Society の複数の主要会議においてワークショップが開催されている状況であり注目され続けていると言える。

2.2 IEEE ComSoc Training

IEEE ComSoc が提供している Education and Training のサービス [2] において、OTFS に関するコースが過去 12 回行われている。

- OTFS - Communication Theory in the Delay Doppler Domain (2021 June)
講師: Ronny Hadani
- OTFS Detection: From Message-Passing to Low-Complexity Iterative Rake Receiver (2021 June)
講師: Emanuele Viterbo
- OTFS and Delay-Doppler Communications: 9 回 (2022 Nov., 2023 (Feb., July, Nov.), 2024 (Feb., July, Oct.), 2025 (April, Sept))
講師: Emanuele Viterbo, Yi Hong, Tharaj Thaj
- Zak-OTFS and Delay-Doppler Processing for Next-Gen Communications (2025 Oct.)
講師: Saif Khan Mohammed

特に、Viterbo 教授らによるトレーニングコースは過去 9 回も開催されており、普及活動に力を入れていることが分かる。

2.3 論文数

表 1 は、OTFS に関する論文の発表件数を Scopus により調査し、年ごとに集計した結果を示したものである。表中の 2 行目は、タイトルに「OTFS」を含む論文数を示している¹。3 行目は、Title, Abstract, Keyword のいずれかに「Orthogonal Time Frequency Space」を含む論文数である²。2 行目および 3 行目のいずれにおいても、論文数の推移は類似した傾向を示しており、2024 年までは概ね指数的な増加が確認される。2025 年については増加率がやや低下しているものの、全体としては引き続き増加傾向にあるといえる。

年	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
件数	5	21	42	93	164	284	381	428
	10	26	46	121	193	329	445	515

表 1 OTFS に関するジャーナル論文の数

第 1 節で述べたように、近年の研究では、OTFS は通信とセンシングの融合 (Integrated Sensing and Communication : ISAC) において、単一の電波を用いてセンシングと通信を同時に実現する手法として検討されている。このような応用分野の拡大を背景として、今後も OTFS に関する論文数は増加することが見込まれる。

ここで、電子情報通信学会に目を向けてみよう。英文論文誌において、タイトルに OTFS を含む論文は、2021 年から 2024 年にかけて 3 件 [3, 4, 5] 発表されている。また、信学技報において、タイトル、キーワード、または抄録に OTFS を含む発表は、2021 年度から 2025 年度にかけて計 17 件 ('21 年度 2 件, '22 年度 1 件, '23 年度 2 件, '24 年度 8 件, '25 年度 4 件) であった。2025 年 1 月には、RCS-SIP-IT 合同研究会において、林海・阪公大教授による招待講演³が行われるなど注目を集めていると言える。しかし、世界的な研究潮流を踏まえると、信学会の論文誌および技報における OTFS 関連の発表件数は、もっと多くても不思議ではない。この点については、筆者自身の活動不足を痛感するところである。

2.4 解説論文

Hadani らによる最初の OTFS の提案 [1] は、OTFS 変調方式を体系的に示した最初の研究として重要である。同提案ではアナログサブキャリアを前提とした記述

¹2017 年は、Hadani らによる WCNC 論文および IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest の 2 件のみであり、件数が少ないため、表の体裁上ここでは除外した。

²Abstract や Keyword においては、他の用語の省略形として OTFs が用いられている例が複数確認された。これらを除外するため、本調査ではフルスペルによる検索を行った。

³林海教授が研究されている通信方式は delay-Doppler domain orthogonal pulse (DDOP) であり、OTFS とは厳密には異なる。しかしながら、高い類似性を有しており、かつ講演のキーワードに OTFS が含まれているため、本稿では OTFS 関連研究の一種としてカウントした。

がなされている一方で、その後、デジタルサブキャリアを用いた離散 Zak 変換に基づく方式が検討されている。また、初期提案では“ideal pulse”を仮定した解析が行われており、実装を考慮する場合には、近似誤差の影響について検討する余地がある。さらに、初期提案において導入された専門用語の一部 (Symplectic FFT, Heisenberg Transform, Wigner Transform) は、離散 Zak 変換に基づく信号処理の枠組みでは必ずしも陽に用いられない場合がある。このような背景から、近年の研究では、離散 Zak 変換を採用した Zak-OTFS に基づく定式化が用いられている [6, 7, 8]。

IEEE Information Theory Society から発行されている BITS 誌には、OTFS に関する解説記事が 2 回にわたり掲載されている [9, 10]。これらの記事では、twisted-convolution に基づく演算や crystalline regime (結晶状態) といった、OTFS 特有の概念や用語が用いられており、情報理論的観点からの体系的な説明が与えられている。一方で、これらの概念は OTFS に特有であるため、初学者にとっては理解に一定の背景知識を要する場合がある。これに対し、IEEE ComSoc Training において提供される OTFS 関連の講義資料では、より通信工学的な立場から説明がなされており、必ずしも高度な情報理論的概念を前提としない構成となっている。このような違いから、OTFS の入門段階においては、ComSoc Training のような教育的資料が技術者にとって有用な情報源となり得る。

2.5 論文のテーマ

研究テーマをいくつかピックアップする。ただし、引用数の多い論文を中心におおまかに拾ったことと、著者の主観が入るため、テーマに偏りがあることをお許しいただきたい。

- チャネル推定および 遅延・ドップラー (DD) 領域処理の高度化
- 低 PAPR 設計, パイロット信号設計, インデックス変調 (IM) を組み合わせた設計
- Fractional Inter-Doppler Interference の抑制
- MIMO-OTFS, Multiuser-OTFS への拡張
- 統合センシング&通信 (ISAC) 応用
- フィールド計測/実験

3 OTFS 変調

本節では、OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) 変調方式が、二重選択性フェージング通信路においてどのように等化を実現するかについて、その基本的な原理を概説する。本稿では、OTFS の定式化として、Zak-OTFS と呼ばれる枠組みを採用する。これは、OFDM 方式の説明において、サブキャリアを連続時間の正弦波として捉えるのではなく、離散時間における DFT 係数として表現する立場に対応している。

3.1 二重選択性フェージング通信路モデル

送信信号（複素ベースバンド等価信号）を $s(t)$ とする。パスの数を P とし、第 i パスの減衰係数、遅延、およびドップラー周波数をそれぞれ α_i , $t_{d,i}$, $f_{D,i}$ とすると、二重選択性フェージング通信路モデルにおける受信信号は、

$$r(t) = \sum_{i=1}^P \alpha_i s(t - t_{d,i}) e^{j2\pi f_{D,i}(t - t_{d,i})} + z(t) \quad (1)$$

と表される。ここで $z(t)$ は加法的白色ガウス雑音である。

送信信号および受信信号はサンプリングにより離散化されるものとする。そのような離散時間モデルにおいて、受信信号ベクトル $\mathbf{r}$ と送信信号ベクトル $\mathbf{s}$ の関係は、 $N_r \times N_s$ 行列 $\mathbf{H}$ を用いて表現される。ここで N_r , N_s はそれぞれ $\mathbf{r}$, $\mathbf{s}$ の次元である。

チャンネル推定およびチャンネル等化とは、 $\mathbf{H}$ を推定すること、および推定された $\mathbf{H}$ を用いて $\mathbf{r}$ から $\mathbf{s}$ を復元することである。しかし、 $\mathbf{H}$ が特定の構造を持たない一般の行列である場合、その推定は困難であり、また $\mathbf{H}$ が既知であっても、チャンネル等化のためには逆行列（あるいは一般化逆行列）を求める必要がある。正方行列の場合、その計算量は行列の次数の三乗に比例する。

一方、ドップラー周波数が無視できるほど小さい場合（すなわち $f_{D,i} = 0$ ）には、通信路は周波数選択性フェージングとなる。このとき、式 (1) の両辺をフーリエ変換することで、

$$R(f) = S(f) \sum_{i=1}^P \alpha_i e^{-j2\pi t_{d,i}f} + Z(f) \quad (2)$$

$$= S(f)H(f) + Z(f) \quad (3)$$

を得る。

周波数領域では、受信信号は送信信号とチャンネルの周波数応答 $H(f) = \sum_{i=1}^P \alpha_i e^{-j2\pi t_{d,i}f}$ との積として表されるため、等化処理の計算量は $s(t)$ の次元 (N_s) に比例する次数まで低減される。また、ベクトル・行列表現の観点からは、 $\mathbf{H}$ が巡回行列という好ましい構造を持つため、FFT により対角化され、等化処理が容易になることを意味している。一方、二重選択性フェージング通信路では、周波数領域でも周波数領域でも積の形で表現することができない。しかし、パスの数 P は信号の自由度（帯域幅 × 時間幅 $\approx N_s \approx N_r$ ）に比べて極めて小さいと考えられる。1つのパスは、1組の遅延とドップラー周波数を持つ。そのため、遅延とドップラーを変数とする空間すなわち Delay-Doppler (DD) 領域においては、パスはスパースに表現できると考えられる。

OTFS は、 N と M の2つのシステムのサイズを決めるパラメータがある。データストリームから QAM シンボルにマッピングを行い、合計 NM 個の QAM シンボルで OTFS の1フレームを構成する。送信する信号は DD 領域 $X_{DD}[k, \ell]$ におかれる。 $0 \leq k \leq N-1, 0 \leq \ell \leq M-1$ 。Zak-OTFS では、DD 領域信号に対し Inverse Discrete

Zak Transform (IDZT) を施す。IDZT は2次元信号に対し、列ごとに IDFT をかけたのち、行をブロックとして1次元に並べ替える操作である [7]。その結果

$$x_{TD}[nM + \ell] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{DD}[k, \ell] W_N^{-nk} \quad (4)$$

が得られる。ここで $W_N = e^{-\frac{2\pi}{N}}$ は DFT の回転因子 (Twiddle Factor) を表す。

以下に示される時間領域 (Time Domain) から DD 領域に戻す操作は、Discrete Zak Transform (DZT) と呼ばれる。

$$x_{DD}[k, \ell] = \sum_{n=0}^{N-1} x_{TD}[nM + \ell] W_N^{nk} \quad (5)$$

離散時間信号 $x_{TD}[\ell']$, $\ell' = 0, 1, \dots, NM-1$ が得られたら適当なパルス波形 $p(t)$ によるフィルタリングを行い、送信信号

$$s(t) = \sum_{\ell'=0}^{NM-1} x_{TD}[\ell'] p(t - \ell' \frac{T}{M}) \quad (6)$$

を得る。パルス波形は、 $\int_{-\infty}^{\infty} p(t) p^*(\ell \frac{T}{M} - t) dt = \delta_{\ell,0}$ を満たすものとする。ここで z^* は z の複素共役、 δ_{ij} は Kronecker delta である。チャンネルの歪みがなければ、DFT/IDFT を用いて、並び替えを行うだけなので、OFDM とシステム構成が大幅に変わるものではない。問題はチャンネルの歪みをどのように推定して補償するのかである。 $p(t)$ は OFDM との互換性を優先した矩形波の採用が有望と思われるが、ドップラー周波数への耐性が好ましくないため、研究論文では帯域制限フィルタも引き続き検討されている状況である。

複素ベースバンド受信信号 $r(t)$ を $p(t)$ の整合フィルタに通し、時間 T/M ごとに標本化を行い、離散時間信号

$$y_{TD}[\ell'] = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) p^*(\ell \frac{T}{M} - t) dt \quad (7)$$

を得る。離散 Zak 変換 (5) により $y_{DD}[k, \ell]$ を得る。

なお、パラメータ T は以下の基準で定める。(1) における $t_{d,i}$ と $f_{D,i}$ の取りうる値の範囲を $[0, t_{d,\max}]$, $[-f_{D,\max}, f_{D,\max}]$ とする。OTFS では $t_{d,\max} \times f_{D,\max} < 1$ であるような underspread の状況を想定する。この仮定のもと $t_{d,\max} < T$ かつ $f_{D,\max} < 1/T$ を満たすように T を定める。

3.2 パイロット信号によるチャンネル推定

本節では、OTFS におけるパイロット信号を用いたチャンネル推定について述べる。OTFS では、パイロット信号 $x_{DD}[k, \ell]$ の配置方法として様々な方式が提案されているが、本節では最も基本的な例として、 $k = \ell = 0$ のみにパイロット信号を配置する方法を取り上げる。具

体的には、 $x_{DD}[k, \ell]$ を次のように定義する⁴。

$$x_{DD}[k, \ell] = N \cdot \delta_{k,0} \cdot \delta_{\ell,0} \quad (8)$$

このとき、対応する離散時間信号は(4)より $x_{TD}[nM + \ell] = \delta_{\ell,0}$ となる。したがって、送信信号は、パルス $p(t)$ を M サンプルごとに1回、合計 N 回送信する構成となる。次に、マルチパス環境における第 i パスに着目する。遅延およびドップラー周波数を、それぞれ

$$t_{d,i} = (\ell_i + \epsilon_{t,i}) \frac{T}{M}, \quad f_{D,i} = (k_i + \epsilon_{f,i}) \frac{1}{NT} \quad (9)$$

と表す。ここで、 $0 \leq \ell_i \leq M-1$, $0 \leq k_i \leq N-1$ は遅延およびドップラーの整数部分を表し、 $0 \leq \epsilon_{t,i}, \epsilon_{f,i} < 1$ はそれぞれ的小数部分である。

以下では説明を簡単にするために、まず遅延およびドップラーが整数グリッド上にある理想な場合を考える。非整数成分を含む一般の場合については、この節の最後に触れる。この仮定の下では、遅延量は離散時間信号 x_{TD} のサンプリング間隔の整数倍となり、ドップラー周波数も、長さ NM の系列に対する離散フーリエ変換 (DFT) の周波数ビンに一致する。

このとき、受信信号に含まれる第 i パスに対応した成分は $y_i[nM + \ell] = \alpha_i e^{j \frac{2\pi}{N} n k_i} \cdot \delta_{\ell, \ell_i}$ と表される。その結果、DD 領域における受信信号は次で与えられる。

$$y_{DD}[k, \ell] = \sum_{i=1}^P \alpha_i \cdot \delta_{k, k_i} \cdot \delta_{\ell, \ell_i} \quad (10)$$

一方で、遅延およびドップラーの小数部分 $\epsilon_{t,i}, \epsilon_{f,i}$ が0でない場合には、パス i に対応する成分は DD 領域上で理想的に分離されない。 $p(t)$ として矩形パルスを用いた場合⁵、遅延方向では信号成分が ℓ_i および $\ell_i + 1$ にまたがって観測される。さらに、ドップラー方向では、sinc 関数状の干渉が生じ、 k_i から離れた領域にまで影響が及ぶことが知られている。

3.3 著者の最近研究とその源流

著者が最近取り組んでいる課題は、前節の最後に述べた、遅延・ドップラーが非整数の場合のチャネル推定とチャネル補正の解決であり、これは、2.5 節挙げた研究テーマのひとつ「チャネル推定および DD 領域信号処理の高度化」に該当する。著者らは、パルス波形とともに窓関数を導入して波形整形を行い、遅延・ドップラーの隣接セル以外へのエネルギーのはみだしを抑制する方式 [11]、遅延とドップラーの2パラメータの推定を、先にドップラー成分だけを Prony 法を用いて抽出したのち、残ったドップラー成分を除去してから遅延成分を推定する2段階 Prony 法 [12]、受信信号をフーリエ変換して上記の手法の遅延とドップラーを入れ替えた方式を並列で

動作させることにより、推定精度を向上させた方式 [13] を提案した。詳細は文献を参照されたい。

筆者が遅延・ドップラー推定の研究に着手したのは2010年頃である。その背景には、「OFDM はドップラー周波数に対して脆弱であり、将来的にはドップラーに強い通信方式が必要になる」という香田徹・九州大学名誉教授の問題意識があった。本稿の結びとして、この点を付記して稿を終える。

参考文献

- [1] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank, “Orthogonal time frequency space modulation,” in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [2] <https://www.comsoc.org/education-training>.
- [3] T. Wu, Z. Bie, and C. Wu, “A sparsely-connected OTFS-BFDM system using message-passing decoding,” *IEICE Trans. Fundam.*, vol. E105-A, no. 3, pp. 576–583, March 2022.
- [4] J. Bai, L. Lan, Z. Song, and H. Du, “Signal detection for OTFS system based on improved particle swarm optimization,” *IEICE Trans. Comm.*, vol. E106-B, no. 8, pp. 614–621, August 2023.
- [5] C. Mei and W. Zhang, “Optimal design of OTFS systems for fractional inter-doppler interference suppression,” *IEICE Trans. Comm.*, vol. E108-B, no. 4, pp. 431–439, April 2025.
- [6] S. K. Mohammed, “Derivation of OTFS modulation from first principles,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 70, no. 8, pp. 7619–7636, 2021.
- [7] F. Lampel, A. Avarado, and F. M. Willems, “On OTFS using the discrete zak transform,” in *2022 IEEE Int. Conf. Comm. Workshops (ICC Workshops)*, 2022, pp. 729–734.
- [8] S. Gopalam, I. B. Collings, S. V. Hanly, H. Inaltekin, S. R. B. Pillai, and P. Whiting, “Zak-OTFS implementation via time and frequency windowing,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 72, no. 7, pp. 3873–3889, 2024.
- [9] S. K. Mohammed, R. Hadani, A. Chockalingam, and R. Calderbank, “OTFS—a mathematical foundation for communication and radar sensing in the delay-Doppler domain,” *IEEE BITS the Information Theory Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 36–55, 2022.
- [10] —, “OTFS—predictability in the delay-doppler domain and its value to communication and radar sensing,” *IEEE BITS the Information Theory Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 56–75, 2023.
- [11] L. Sun and Y. Jitsumatsu, “Design of otfs signals with pulse shaping and window function for otfs-based radar,” *arXiv preprint arXiv:2506.04861*, 2025.
- [12] Y. Jitsumatsu and L. Sun, “Two-stage prony-based estimation of fractional delay and doppler shifts in otfs modulation,” in *2025 IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Comm. (PIMRC2025)*, 2025.
- [13] —, “Parallel delay-doppler estimation via order-reversed two-stage prony method,” *arXiv preprint arXiv:2511.19866*, 2025.

⁴この正規化は、時間領域において各送信パルスの振幅を1とするためのものであり、解析を簡単にする目的で採用している。

⁵実際には送受信フィルタ設計として様々なパルスが検討されており、ここでは代表例として矩形パルスを用いる。