

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360174

研究課題名（和文） 力学系理論による符号設計とそのデジタル通信への応用

研究課題名（英文） Code design based on dynamical systems theory and its application to digital communications

研究代表者

香田 徹 (KOHDA TOHRU)

九州大学・大学院システム情報科学研究所・特命教授

研究者番号：20038102

研究成果の概要（和文）：

次世代無線通信方式として注目を集める OFDM（直交周波数分割多元）方式は、ドップラー効果による周波数のずれに対し脆弱な点を課題として抱えていた。研究代表者らは、サブキャリア間の直交性を必要としない擬似直交マルチキャリア CDMA を提案し、さらにこの結果を発展させたユーザ間の時間・周波数の同期誤差に強い耐性をもつ Gabor-Division (GD)-CDMA を提案した。GD-CDMA システムは次の 3 つの特徴を兼ね備えている。(1) 負のマルコフ符号を用いることでユーザ間干渉を独立同分布 (i. i. d.) 符号に比べ最大 9/25 まで削減可能 (2) 時間と周波数のオフセットを同時に推定可能な 2 次元同期捕捉が可能。(3) 時間領域、周波数領域、2 種類のマルコフ符号を使って信号帯域を同時拡散する。符号のマルコフ性により平坦な周波数スペクトルが得られる。以上の結果から、GD-CDMA は、OFDM 方式で問題であったドップラー周波数シフト対策が可能であることが示された。周波数の同期保持にはフィードバック構造の Phase Locked Loop (PLL) 回路がもっぱら用いられるが、超広帯域通信での応用を見据え、研究代表者らはこれとは異なり、ニュートン法に基づく到来波から周波数と位相を直接同定する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system has attracted a lot of attention in wireless mobile communications, which has drawback that its receiver is sensitive to frequency offset caused by Doppler effect. We proposed quasi-orthogonal multicarrier CDMA system which does not require complete orthogonality between subcarriers. Based on this result, we propose a Gabor-division (GD) CDMA system which is robust to time and frequency synchronization errors. Such a system has three desirable properties: (1) Markov spreading codes with negative auto-correlation can reduce the variance of multiple access interference (MAI) by a factor of 9/25. (2) Two dimensional code acquisition method estimates time and frequency offsets simultaneously. (3) Joint use of time and frequency domain spreading codes realizes almost flat spectrum. These properties imply that GD-CDMA system can solve the problem caused by Doppler frequency shift. Phase locked loop (PLL) circuit is widely employed in the receiver to maintain the synchronization of the phase of the transmitted signal and local oscillator. We have proposed a new method based on Newton's method, which directly gives estimates of frequency and phase of incoming signal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：カオス力学系，擬似直交系列，同期確立，時間・周波数同時表現

### 1. 研究開始当初の背景

カオスに基づくCDMA通信の研究では，従来，チップ波形として矩形波が仮定されていた．しかし，実際の無線通信では矩形波がそのまま用いられることはなく，周波数帯域制限のための波形整形が施される．波形を変えると相互相関の分布に大きな影響を与える．現行の商業用CDMA通信では，ハードウェア化の容易さからレイズドコサイン(raised cosine)波形がよく用いられているが，より効率の良いものが求められる．スペクトル拡散通信のためのチップ波形を導出することが研究開始当初の目的であった．また，CDMA通信に関しては，当時，大容量のデータ通信を目指したマルチキャリア方式の研究が盛んであった．マルチキャリア方式では，サブキャリア間干渉が問題となる．

携帯電話・無線通信の分野で世界標準化の最有力候補 OFDM 方式は，スペクトル効率が高くマルチパスフェージングにも強いと信じられているが，搬送波キャリアの直交性の保持を必須条件としており，ドップラー効果による周波数オフセット，時間同期の誤差に対し脆弱である．本研究では，無線通信，特に CDMA 通信用拡散符号と周波数帯域制限波形の同時設計に，カオス力学系の立場から取り組んだ．

### 2. 研究の目的

携帯電話・無線通信の分野では OFDM (直交周波数多重) 方式の実用化が急速に進んだ．OFDM はスペクトル効率が高くマルチパスフェージングにも強いものの，搬送波キャリアの直交性の保持を必須条件としており，ドップラー効果による周波数オフセット，時間同期の誤差に対し脆弱である．信頼性の高い通信を行うには，雑音や干渉のある通信路の適切なモデルの構築とその推定方法が通信システム設計の上で極めて重要である．スペクトル拡散方式は，単一ユーザで非拡散通信の場合時の 100 倍程度の帯域を利用するので，一見スペクトル利用効率が悪いように見えるが，妨害波・干渉波に強い点が OFDM に比べ有利である．また，広帯域性からくる時間分解能の高さと同期捕捉法を組み合わせれば複数到来波の遅れ時間のチップレベルでの推定が可能であり，マルチパス対策が可能である．本研究では，時間・周波数の同時推定を可能にする Gabor2 次元表現に基づく通信システムを提案する．本方式は Gauss 包絡線キャリアに基づくので，同期誤差に対し頑強となることが期待される

### 3. 研究の方法

①サブキャリア間にあえて干渉を導入し，同期ズレに対する耐久性を高めた「擬似直交マルチキャリア方式」を提案し，その性能評価を行った．時間と周波数の分解能に関する不確定性原理の下限を満たす波形は，ガウス波形であるが，OFDM ではキャリア間干渉ゼロが前提条件であり，これを満たさないガウス波形は採用されていない．一方，本方式ではキャリア間干渉を許すので，波形整形フィルタのガウス波形が有力な候補になる．②カオス発信回路によるウルトラワイドバンド (UWB) 通信の有効性の検証を行う．UWB 通信に関する通信法規としては，米国では連邦通信委員会が 2002 年に周波数帯域とそれぞれ許容電力密度が定められており，わが国でも総務省により利用可能な帯域が定められた．本研究では，わが国の使用可能帯域と電力密度のつとり，室内無線通信用にカオス擬似乱数を用いた UWB 通信の提案・評価を行った．③次世代無線通信の本命と目される OFDM-based MC-CDMA と，その対抗馬として研究代表者らの提案する QOFDM based MC-CDMA との性能比較を行った．研究代表者らは，周波数とシンボル区間の完全同期を仮定したもとの性能評価を行い，Gauss 波形により生じたシンボル間干渉 (ISI) がマルコフ符号により大幅に減少することを示した (Globecom2008, 11 月)．マルコフ符号は i. i. d. 符号に比べ，信号帯雑音比 (SIR) で 61 パーセントの高い改善率を示した．④CDMA のスペクトル拡散符号が畳み込まれた擬似乱数信号のエネルギー集中度による符号と波形の同時設計する Markov Coded PSWF (Prolate Spheroidal Wave Function) を議論した．これは設計が複雑である．一方，ガウス波形とマルコフ符号の組み合わせは，簡単に設計できしかも性能も十分良いことが示された．

⑤周波数の同期保持にはフィードバック構造の Phase Locked Loop (PLL) 回路がもっぱら用いられる．超広帯域通信での応用を見据え，研究代表者らはこれとは異なり，ニュートン法に基づく到来波から周波数と位相を直接同定する手法を提案した．この結果を用いて，周波数・位相推定回路及びそのアルゴリズムについて特許を出願・公開した．この回路はフィードバック構造を持たないので安定性の問題がないので，雑音や高温・低温など環境の悪い場面での利用が期待される

### 4. 研究成果

カオスを利用した通信の研究は 1990 年代に始まったが，その多くはカオス実数値軌道を

そのまま利用するアナログ通信であり、現在隆盛を極めるデジタル通信の諸技術の上に直接載せることが困難と考えられる。一方、本提案手法は、カオス力学系をバイナリ系列の設計に役立てる手法なので、CDMA や OFDM などの既存のデジタル通信技術に容易に適合できる利点を持つ。第 3.9 世代携帯電話で利用される OFDM 方式では、通常のシンボル同期に加えて、サブキャリア間の干渉を無くすために高精度な周波数同期が必要であり、通話者の移動にともなうドップラー効果への対策が必須となる。

研究代表者らはこの状況に鑑み、2008 年にサブキャリア間の直交性を必要としない擬似直交マルチキャリア CDMA を提案し、さらにこの結果を発展させたユーザ間の時間・周波数の同期誤差に強い耐性をもつ Gabor-Division(GD)-CDMA を提案した。その特徴は以下の 2 点である。

(1) 負のマルコフ符号を用いることでユーザ間干渉を独立同分布 (i. i. d.) 符号に比べ最大 9/25 まで削減可能であることを示した。

(2) マルコフ拡散符号を用いることで、元来ベル型の Gauss 波形を時間周波数の 2 次元格子状に並べた GD-CDMA の周波数スペクトルが平坦になることを示した。

以上の結果から、GD-CDMA は、OFDM 方式で問題であったドップラー周波数シフト対策が可能であることが示された。これらの結果は、信号処理分野では最大規模の国際会議 ICASSP2011 で公表された。

当初計画のうち、(1) シングルキャリア CDMA におけるチップ波形最適化の問題を解決した。(2) マルチユーザ受信器 (MUD) におけるカオス拡散符号の性能評価を実施し、国内研究会で公表した。(3) マルチキャリア CDMA の設計問題に関して、擬似直交 CDMA が Globecom2008 に採録された。この結果をさらに進めた周波数分割に基づく FD-CDMA を提案した。(4) 通信路符号設計の力学系理論の視点について、LDPC 符号における Gallager の復号法の力学系の解釈を与えた。以上の小課題について、当初計画の目標に到達している。残された課題として、(5) 同期捕捉、(6) マルチパスへの対応 (7) 測距があり、これらは現在検討中の GD-CDMA の受信機設計により可能となる。以上のように、当初計画はほぼ完遂できたと言える。また、従来のフィードバック構造に基づき、位相の誤差を逐次補正する位同期回路に代わり、到来波の周波数と位相を同時に直接推定する手法を提案し特許を申請した。

さらに、アナログデジタル変換器で標準の PCM 方式、 $\Sigma \Delta$  変調に代わる、新しい  $\beta$  進展開に関して理論的重要な結果を得ておりこれに関する特許を取得した。AD/DA 変換については、当初計画に全くなかったが、力学系

に基づく符号設計の根幹技術の開発に成功しており、現在、FIRST 合原最先端数理プロジェクト発足において、重要なテーマのひとつとして採択され、理論・実践の多数の研究者を巻き込んだ研究グループを形成するに至った。

本研究で得られた成果は、学会誌 5 件、学会発表 44 件、図書 6 件で公表された。特に重要性の高いと思われるものについては特許出願を、学会誌・国際会議での公表に先立って行った。本研究期間に、6 件の特許申請を行った。

## 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 5 件)

- ① Y. Jitsumatsu and T. Kohda, “Asynchrony, Markov, interference,” RIMS Kokyuroku, vol. 1742, pp. 165-179, May 2011. 査読無
- ② T. Kohda, Y. Fukae, and K. Aihara, “Symbolic Dynamics of Beta Encoders,” Mathematical Engineering Technical Reports, METR 2010-14, pp. 1-12, May 2010. 査読有
- ③ A. G. Hafez, M. T. A. Khan, and T. Kohda, “Clear P-wave arrival of weak events and automatic onset determination using wavelet filter banks,” Digital Signal Processing, vol. 20, no. 3, pp. 715-723, May 2010. 査読有
- ④ 香田 徹, “カオスによる信号処理-デジタル通信にアナログは活用できるか?-,” IEICE Fundamentals Review, vol. 2, no. 4, pp. 16-36, 2009 年 4 月. 査読有
- ⑤ A. Hafez, T. Khan, and T. Kohda, “Earthquake onset detection using spectro-ratio on multi-threshold time-frequency sub-band,” Digital Signal Processing, vol. 19, no. 1, pp. 118-126, Jan. 2009. 査読有

[学会発表] (計 44 件)

- ① T. Kohda, Y. Horio, and K. Aihara, “ $\beta$ -expansion’s attractors observed in A/D converters,” IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical, Nov-Dec. 2011. Kyoto, Japan
- ② T. Kohda and K. Aihara, “Binary sequences using chaotic dynamics and their applications to communications,” IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical, Nov-Dec. 2011, Kyoto, Japan
- ③ T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, “Markovian SS codes flatten the spectrum of UWB Gaussian pulse,” in 2011 IEEE Int.

Conf. on Ultrawide band, Sep. 2011, Bologna, Italy

④ T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, “2D Markovian SS codes flatten time-frequency distribution of signals in asynchronous Gabor division CDMA systems,” in 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 2011, Prague, Czech Republic

⑤ T. Kohda, K. Ogiwara, T. Khan, and K. Aihara, “Frequency estimator using method,” in Proc. of 2010 Int. Sympo. on Spread Spectrum Techniques and Applications, Oct. 2010, Taichung, Taiwan

⑥ T. Kohda, Y. Jitsumatsu, K. Fujino, and K. Aihara, “Frequency division FD-based CDMA system which permits frequency offset,” in Proc. of 2010 Int. Sympo. on Spread Spectrum Techniques and Applications, Oct. 2010, Taichung, Taiwan

⑦ T. Kohda, T. Une, and K. Aihara, “A cochlear active transmission-line model without wave reflection,” in Proc. of 18th Workshop of Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, May 2010, Dresden, Germany

⑧ 香田 徹, 緒方正虎, “パイプライン型 A/D 変換器とその誤差に関する考察”, 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2010 年 3 月, 長野市

⑨ 香田 徹, 深江 脩紀, “ $\beta$  展開を用いた AD/DA 変換器の量子化誤差”, 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2010 年 3 月, 長野市

⑩ 香田 徹, 荻原 幸之助, “到来波の周波数同定と位相同定に関する一考察”, 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2010 年 3 月, 長野市

⑪ 香田 徹, 畝 孝雄, “蝸牛の伝送線路モデル-再論”, 聴覚研究会, 2009 年 12 月, 熊本市

⑫ 香田 徹 “蝸牛の無反射能動分布定数回路モデル”, 聴覚機能とシミュレーション第 11 回定例シンポジウム, 2009 年 12 月

⑬ Y. Jitsumatsu, T. Kohda “Quasi-orthogonal multi-carrier CDMA,” in Proc. IEEE Globecom 2008, Nov. 2008, New Orleans, USA

⑭ Y. Jitsumatsu, T. Kohda, “Markov codes make Gaussian pulse superior to a raised cosine pulse,” in Proc. 10th IEEE Int. Symp. Spread Spectrum Techniques and Applications, Aug. 2008, Bologna, Italy

⑮ Y. Jitsumatsu and T. Kohda, “Prolate spheroidal wave functions induce Gaussian chip waveforms,” in Proc. of 2008 IEEE Int. Symp. Inform. Theory (ISIT), Jul. 2008, Toronto, Canada

[図書] (計 6 件)

① 香田 徹・吉田啓二(著)、電気回路、朝倉書

店、2008 年、251 頁

② 香田 徹(著)、非線形理論(電気情報通信レクチャーシリーズ)、コロナ社、2009 年、196 頁

③ T. Kohda(分担執筆), “3-dimensional i. i. d. binary random vectors governed by Jacobian elliptic space curve dynamics,” in Advances in Discrete Dynamical Systems (Advanced Studies in Pure Mathematics), S. Elaydi, K. Nishimura, M. Shishikura and N. Tose, Eds. World Scientific, vol. 53, pp. 95-112, Jun. 2009.

④ 香田 徹、音の高さのモデル、森周司、香田 徹編、聴覚モデル(音響サイエンスシリーズ)、コロナ社、p1-18、2011 年

⑤ 香田 徹、蝸牛の物理的機構とそのモデル、森周司、香田 徹編、聴覚モデル(音響サイエンスシリーズ)、コロナ社、p. 19-57、2011 年

⑥ T. Kohda, T. Une and K. Aihara (分担執筆), “An Active, Reflectionless Transmission-Line Model of the Cochlea: Revisited”, What Fire is in Mine Ears: Progress in Auditory Biomechanics, C. A. Shera, E. S. Olson, Eds. AIP Conf. Proc. 1403, pp. 578-583, July 2011

[産業財産権]

○出願状況(計 6 件)

①名称: 変換器、変換方法、プログラム、及び記録媒体

発明者: 弘中聖士、香田 徹、合原一幸

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2009-524464、PCT/JP2008/062897

出願年月日: 2008. 7. 17

国内外の別: 国内、国外

②名称: 同定装置及び同定方法

発明者: 香田 徹、荻原幸之助

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2010-038757、PCT/JP2011/053821

出願年月日: 2010. 2. 24

国内外の別: 国内、国外

③名称: スケール付  $\beta$  写像に基づく A/D 変換器離散時間積分器による実現法

発明者: 堀尾喜彦、神野健哉、香田 徹、合原一幸

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2010-085212、PCT/JP2011/001664

出願年月日: 2010. 4. 1

国内外の別: 国内、国外

④名称: 拡散装置、通信装置、送信装置、通信方法及びプログラム

発明者: 香田 徹、實松 豊、合原一幸

権利者: 同上

種類: 特許

番号：特願 2011-105717  
出願年月日：2011. 5. 10  
国内外の別：国内

○取得状況 (1 件)

名称：信号変換器、パラメータ決定装置、パラメータ決定方法、プログラム及び記録媒体  
発明者：弘中聖士、香田徹、合原一幸  
権利者：科学技術振興機構、九州大学  
種類：特許  
番号：特願 2010-526680  
取得年月日：2012. 1. 13  
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香田 徹 (KOHDA TOHRU)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・特命教授  
研究者番号：20038102

(2) 研究分担者

實松 豊 (JITSUMATSU YUTAKA)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・准教授  
研究者番号：60336063

緒方 将人 (OGATA MASATO)

九州産業大学・工学部・准教授  
研究者番号：90325548

(3) 連携研究者

なし