

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820162

研究課題名(和文) オフセットを許容する時間・周波数領域同期法

研究課題名(英文) Time-frequency synchronization method allowing offsets

研究代表者

實松 豊 (Jitsumatsu, Yutaka)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・准教授)

研究者番号：60336063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：OFDM方式はサブキャリアが周波数軸上で重なり合っているため周波数オフセットに弱い。研究代表者らの提案する時間領域と周波数領域の拡散符号を同時に利用するガボル分割スペクトル拡散システム(GD/S3)は、周波数オフセットに強い通信方式である。通信路の伝搬遅延とドップラー周波数の推定において計算コストの高い2次元探索を避けるため、遅延を推定する時分割符号を用いる受信器とドップラー推移を推定する周波数分割符号を用いる受信器を交互に利用する位相更新ループ(PUL)法を提案した。PUL法を応用して、複数物体検出レーダと、符号分割により高次のMPSKを実現する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems are sensitive to frequency offset because subcarriers in OFDM system overlap each other in frequency domain. Gabor Division Spread Spectrum System (GD/S3) proposed by the leader of this research project et al. is robust to a frequency offset. In order to avoid a two-dimensional search for a time delay and a Doppler frequency shift of the channel, we propose a Phase Updating Loop (PUL) method that alternately uses a time-division (TD) code receiver for delay estimation and a frequency-division (FD) code receiver for Doppler estimation. As applications of PUL method, we propose a multiple-target detection radar system and a method for realizing higher order MPSK demodulator employing code-division technique in spread spectrum systems.

研究分野：無線通信, 信号処理

キーワード：通信方式 スペクトル拡散 測距 レーダー 物体検出

1. 研究開始当初の背景

CDMA 方式は、第三世代携帯電話標準方式に採用されたが、第四世代では OFDM(直交周波数多元)に取って代わられた。OFDM の特徴は、限られた周波数資源で高速なデータ通信を可能にするため、互いに直交するサブキャリアを用いて情報を並列伝送することにある。しかし、その代償として正確な周波数同期が求められ、同期保持のためのパイロット信号が多数必要となった。一方、CDMA やその基礎となるスペクトル拡散(SS)方式は、周波数利用効率では OFDM に劣るものの、未知の干渉や悪意のある妨害波への耐性がある点では優れる。携帯電話システムとは異なる独立運用できるシステムとして、悪環境でも通信できる無線技術は重要と考えられる。スペクトル拡散方式は時間分解能が高く、測距用信号として使えることが知られている。実際、GPS で利用され、正確な時間同期とそれによる位置の正確な同定を可能にしている。

研究代表者はスペクトル拡散方式とそのための拡散符号設計の問題を 2000 年ごろから研究している。本研究の企画提案に先立って、周波数と時間の双対性の概念に基づき、従来の SS 符号の周波数双対版を考え、周波数の正確な同定が可能なシステムを提案した。研究開始の直前には、従来の SS 符号と周波数双対版 SS 符号に分解可能な 2 次元 SS 符号を使うシステム(ガボール分割スペクトル拡散システム(GD/S<sup>3</sup>))を提案していた。本研究課題では、この GD/S<sup>3</sup> をさらに発展させた。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、GD/S<sup>3</sup> 方式を発展させて、通信路における時間と周波数の同期オフセットに強いデジタル無線システムを設計することである。近年携帯電話システム等に採用されている直交周波数多重(OFDM)方式は、周波数利用効率は高いものの、周波数の同期オフセットに極めて弱い。強力な雑音、未知の干渉・妨害波、大幅なドップラー周波数推移の存在が想定される極めて劣悪な環境下で、信頼性の高い通信を行うには、これらに対抗できる受信器が必要である。

遅延・周波数の高精度の推定は、レーダーにおいては物体の位置と速度の検出を意味する。本研究の第二の目的は、GD/S<sup>3</sup> 信号を用いて、高い精度の測距とドップラー周波数の推定を可能にすることである。研究代表者が提案している GD/S<sup>3</sup> は、通信とレーダーシステムの両方で利用できる。

3. 研究の方法

(1)レーダー問題の基本は、送信信号と受信信号の間に発生する遅延時間(t0)とドップラー周波数(f0)を推定することである。検出器の出力は、s(t, f) という形式の 2 変数関数であり(t, f) = (t0, f0)のときに|s|は

ピーク値を取る。2次元探索を行う必要があり、限られた時間内に検出するには分解能が犠牲となる。高分解能を達成するには通常長大な探索時間が必要である。本研究課題の特色は、受信信号の時間領域と周波数領域の 2 つの表現を同時に考えることにある。

効率的な同期確立を可能とするため、時間領域表現における t0 の役割と周波数領域表現における f0 の役割が全く同じになるように送信信号を設計することを提案した。

(2) 遅延とドップラーの 2 次元探索を避けるにはどうすべきか検討した。その結果、遅延(t0)を推定するための時間分割(Time Division: TD)符号による受信器とドップラー周波数(f0)を推定するための周波数分割(Frequency Division: FD)符号による受信器を交互に用いるという方法を提案した。図 1 は、受信器の構成例を示しており、上半分が周波数推定部、下半分が遅延推定部である。TD 受信器, FD 受信器は、それぞれ相関器アレイで出来ている。

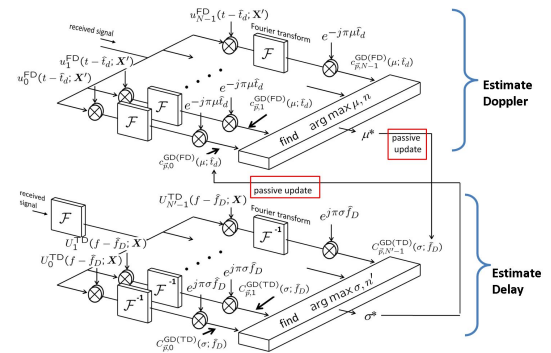


図 1

t0, f0 の推定値は、適当な初期値から始め、10 回程度更新する。初期値が t0, f0 から離れていると、更新回数が少ないうちは、見当違いの推定をするが、何度か更新するうちに正解を見つける。図 2 に(t0, f0)の更新の軌道の例を示す。この例では、(0,0)から出発して、11 回の更新の後、正解にたどり着いている。この方法の欠点は、TD, FD 受信器はそれぞれ相関器アレイからなっており受信機サイズと消費電力が大きいことである。欠点はあるものの、この方法により遅延とドップラーの推定を効率的に行えるようになった。

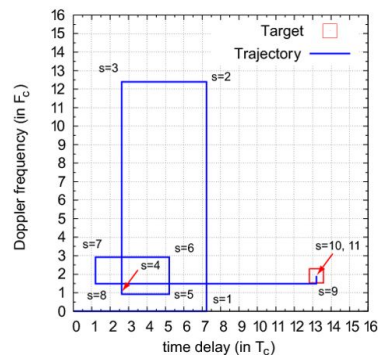


図 2

(3)レーダーの問題においては探索範囲に複数の物体が存在する場合を想定しなくてはならない．2つの物体が探索範囲内にある場合，従来の一般的な検出法では真の像に加えて偽の像が現れる．すなわち 真の物体 $(t_0, f_0)$ ,  $(t_1, f_1)$  に加えて $(t_0-t_1, f_0-f_1)$  等の位置でも検出器がピーク値を出してしまうことがある．複数の物体がある環境下で(2)の方法を実験したところ，反復更新の収束先は偽の位置になることはなかった．また，初期値を変えることで収束先は $(t_0, f_0)$  になったり $(t_1, f_1)$  になったりすることが分かった．したがって，複数の初期値から更新を開始することで，複数個の物体を検出できた．しかし4つ以上の物体を正しく検出することは困難であった．より多くの物体にも対応するため，本研究では探索領域を分割して探索する方法を検討した．

(4)(2)の方法により，高精度の同期が確立できるようになったので，同期の確立・保持を前提にした効率の良い通信が可能かどうかを検討した．通常の通信システムでは，多重度が32以上であればMPSKよりもQAM(直角位相振幅変調)の方が，ビット誤り率も低く効果的である．しかしながら，本研究課題では，高多重度のMPSKシステムを検討した．振幅の情報は情報伝達とは別の目的で利用することを想定している．

#### 4．研究成果

研究代表者らの提案したガボール分割スペクトル拡散システム(GD/S3)が，時間と周波数の揺らぎに強い同期確立手法であることを数理的に示すとともに，コンピュータシミュレーションによる性能評価を行った．本研究の成果は以下の4点である：

(1) 時分割 (Time Division: TD) 符号と周波数分割 (Frequency Division: FD) 符号による2種類の受信機を提案した．

(2) TD符号による受信器とFD符号による受信器を交互に利用することで，通信路の遅延とドップラー周波数を交互に推定するPhase Updating Loop (PUL)法を提案した．

(3) PULをレーダー問題に応用し，複数の物体を検出するCode Division Multiple Target (CDMT)法を提案した．

(4)  $M=32$ 以上のMPSK(多値位相シフトキーイング)信号の検出するdelay-Doppler Space Division multiplexing (dD-SDM)法を提案した．図3に $M=32$ の場合のdD-SDMの概念図を示す．各層は，8PSKシステムであり，スペクトル拡散符号により，符号分割を行い各層の信号を重ね合わせている．

以上4点以外の成果としては，TD符号を用い

た受信器に，圧縮センシングに基づく手法を取り入れた遅延時間推定法を提案した．受信器の想定する遅延波の数が少ない範囲では，この手法が良好な推定性能を持つことを示した．

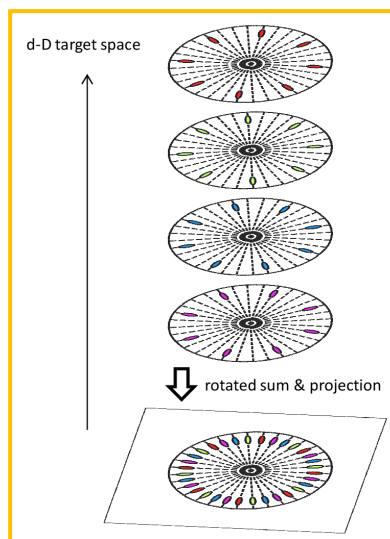


図3

#### 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 K. Matsumura, "A ary to binary conversion for random number generation using a encoder," IEICE Nonlinear Theory and Its Applications, vol.7, no. 1, pp.38-55, 2016. doi.org/10.1587/nolta.7.38

(2) T. Makino, Y. Iwata, K. Shinohara, Y. Jitsumatsu, M. Hotta, H. San and K. Aihara, "Rigorous Estimates of Quantization Error for A/D Converters Based on Beta-Map," IEICE Nonlinear Theory and Its Applications, vol. 6, no.1, pp.99-111, 2015. doi.org/10.1587/nolta.6.99

(3) Y. Jitsumatsu, M. Hashiguchi, and T. Higuchi, "Optimal Sign Patterns for a Generalized Schmidl-Cox Method," Lecture Notes in Computer Science 8865, vol.269-279, 2014. doi.org/10.1007/978-3-319-10262-7\_1

(4) Y. Jitsumatsu and T. Kohda, "Digital Phase Updating Loop and Delay-Doppler Space Division Multiplexing for Higher Order MPSK," LNCS 8715, pp.1-5, 2014. doi.org/10.1007/978-3-319-12325-7\_23

( 5 ) Y. Jitsumatsu, T. Kohda and K. Aihara, " {Delay-Doppler Space Division-based Multiple-Access Solves Multiple-Target Detection," LNCS 8310, pp.39-53, 2013.  
doi.org/10.1007/978-3-319-03871-1

〔学会発表〕(計 30 件)

[1] S. Ito, D. Yang, and Y. Jitsumatsu, " Estimation of Multi-path Channels by Using the Annihilating Filter Method," 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, 2015.

[2] T. Higuchi and Y. Jitsumatsu, " Performance Analysis of a Time Synchronization Method for Multipath Fading Channels with Doppler Shift," 17th Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Commun., 2014.

[3] T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, " Phase-tuned layers with multiple 2D SS codes realize 16PSK communication," 2014 IEEE Wireless Commun. Networking Conference, 2014.

[4] T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, " Recovering noncoherent MPSK signal with unknown delay and Doppler using its ambiguity function," 4th Int. Workshop on Recent Advances in Broadband Access Networks (RABAN2013), pp.251-256, 2013.

[5] T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, " PLL-free Receiver for Gabor Division/Spread Spectrum System," Proc. 9th IEEE Int. Conf. Wireless and Mobile Computing, Networking and Commun. (WiMob2013), pp. 662-669, 2013.

[6] T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, " Signals that can be easily time-frequency synchronized from their ambiguity function," Proc. IEEE Information Theory Workshop, pp.439-443, 2013.

[7] Y. Jitsumatsu, T. Kohda, and K. Aihara, " Spread Spectrum-Based Cooperative and individual time-frequency synchronization," Proc. 10th Int. Symp. Wireless Commun. Syst. pp.497-501, 2013.

[8] T. Kohda, Y. Jitsumatsu, K. Aihara, " Gabor Division/Spread Spectrum System is Separable in Time and Frequency Synchronization," Proc. Veh. Technology Conf. 2013 Fall, 2013.

[9] T. Kohda, Y. Jitsumatsu, and K. Aihara, " Separability of Time-Frequency Synchronization," Proc. Int. RADAR Symp.2013, pp.964-969, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 5 件)

名称: 信号伝送方法及び送信機  
発明者: 香田徹, 實松豊, 合原一幸  
権利者: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-124389,  
特開 2015-2359

出願年月日: 平成 25 年 6 月 13 日

国内外の別: 国内

名称: 同期装置, 同期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: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-175279

出願年月日: 平成 25 年 8 月 27 日

国内外の別: 国内

名称: 通信方法及び受信機

発明者: 香田徹, 實松豊, 合原一幸

権利者: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-177366

出願年月日: 平成 25 年 8 月 28 日

国内外の別: 国内

名称: 受信機, 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: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-209734

出願年月日: 平成 25 年 10 月 4 日

国内外の別: 国内

名称: 受信器、通信方法及び記録媒体

発明者: 香田徹, 實松豊, 合原一幸

権利者: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2014/72344

出願年月日: 平成 26 年 8 月 26 日

国内外の別: 国際

取得状況(計 2 件)

名称: 受信器, 受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: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 特許第 5725458 号

取得年月日: 平成 27 年 4 月 10 日

国内外の別: 国内

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: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 特許第 5751553 号

取得年月日: 平成 27 年 5 月 29 日

国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.me.inf.kyushu-u.ac.jp/~jitungatu>

6．研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし