

平成 22 年 5 月 24 日現在

機関番号：21602
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560069
 研究課題名(和文) 零相関範囲と低ピーク値を持つ系列セットの生成法と応用の研究
 研究課題名(英文) Zero-Correlation Zone Sequence Set and Low-Peak Pseudo-White-Noise Sequences and Their Applications
 研究代表者
 林 隆史 (HAYASHI TAKAFUMI)
 会津大学・コンピュータ理工学部・教授
 研究者番号：2021858

研究成果の概要(和文)：通信や距離計測、超音波イメージングや電子透かしには、様々な数字の列(系列)が用いられている。様々な特性をもった系列の生成方法の発見・開発は、理論的にも応用面で有益であると考えられる。本研究では、相関関数の値がある一定の位相差内で0となる性質をもった系列セットと、自己相関関数のサイドローブが全て0となる疑似白色雑音について、15種類を越える系列生成方法を発見し、それらの応用について検討を行った。

研究成果の概要(英文)： Sequences having good correlation properties, which include ZCZ sequence sets and pseudo-white noise, are used in various applications, such as communication systems, radar, position detection, and ultrasonic imaging. In the present research project, more than 15 novel sequence constructions were proposed and the performance of applications of these sequences are evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学基礎

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：系列設計、疑似白色雑音、零相関系列セット、低ピーク比系列、計測工学、差集合、完全系列、相補系列

1. 研究開始当初の背景

本課題では、零相関範囲を有する系列セット(以下、ZCZ系列と略)の生成方法とその数理的性質、応用を研究する。ZCZ系列とは、

以下に示す二つの条件を満たす系列セットのことである。

- (1) セットのどの系列についても、その自己相関関数が、位相差の絶対値が1以上Z

- 以下で、常に 0。
- (2) セットのどの系列の対についても、その相互相関関数が、位相差の絶対値が Z 以下で、常に 0。

このような系列セットを $Zcz(L,N,Z)$ と表す。ここで、 L は系列の長さを、 N は系列セットの系列数を表す。相関関数が 0 となる位相差の範囲を零相関範囲と呼ぶ。性質 1) は同期捕捉、時間や距離のずれの測定に、性質 2) はチャンネル特定に利用することができる。通信、計測などで、 M 系列、嵩系列、Barker 系列等が広く用いられている。これらの系列の相関関数の値が小さいことを利用しているのであるが、ある種の応用では、相関関数の値が系列の自乗和に対して相対的に小さいだけではなく相関関数の値が零である事が要求される事がある。このような要求に答えるために、一定の位相差範囲内では相関関数が零となるように設計された系列が ZCZ 系列である。応用面では、よりエネルギー効率の高い ZCZ 系列が望ましい。

系列のエネルギー効率は、系列の Root Mean Square (RMS) 値と系列のピーク値の比（ピーク比の逆数）で示すことができる。系列を応用したシステムの構成が複雑になることを避けるために、用いられる系列は、2 値か 3 値 (± 1 及び 0) であることが望ましい。通信に應用される系列は、偶相関(周期相関)と奇相関の両方で、相関関数の値が小さいことが要求される。2 値 ZCZ 系列は、エネルギー効率は高いものの、偶相関と奇相関に同時に対応したものが存在しないことがわかっている。一般に、 $Zcz(L, *, Z)$ となる ZCZ 系列セットの系列数の理論的上限は $L/(Z + 1)$ に等しい。実際の系列数 N がこの上限値に等しいか近いことが望ましい。現在知られている 2 値(系列の値が ± 1) ZCZ 系列セットの系列数は、 ZCZ 系列の系列数の理論的上限の約半分にとどまっている。

系列生成法についての研究の進展によって、 ZCZ 系列生成方法には、様々な方法が存在することがわかってきた。しかしながら、以下の 5 つの問題がある。

- (1) 生成される ZCZ 系列について、生成可能な長さ、本数、零相関範囲の広さ以外の数理的性質はほとんど明らかにされていない。
- (2) ZCZ 系列では、零相関範囲の外に相関関数のピークが存在し、そのピークが小さい方が応用上は望ましい。しかしながらピークを系統的に制御する系列生成方法については、少数の研究しか存在しない。
- (3) ZCZ 系列の生成方法は、アダマール行列、相補系列、完全系列などを“原料”として用いているものが多い。これらの原料のもつ数理的性質を利用して生成

された ZCZ 系列の性質を系統的に制御する方法の研究もごく少数であり、まだ未解明の点が多い。

- (4) 新規系列生成方法の開発につながるような ZCZ 系列生成方法の数理的条件などが明らかになっていない。
- (5) 系列生成方法ごとに、生成できる系列の本数や長さに制限があり、応用上の障害となっている。

これらの課題の解決は、本研究開始当初、重要な意味を持っていた。本研究は、これらの課題を解決することを狙って行われ、いくつかの成果をあげることができた。

2. 研究の目的

研究内容とその特色： 本研究課題では ZCZ 系列で、以下に示す性質をより多く満たすものを、研究の対象とした。

- (1) 理論的上限に等しいか、それに近い系列数を有している。
- (2) 非周期、周期、奇相関の全てに対応して零相関範囲を有している。
- (3) 零相関範囲範囲外の相関関数（自己相関および相互相関）のピーク値が小さい。
- (4) 系列の要素のほとんどが非零要素(1 か -1) で、零要素が少ない。
- (5) 生成できる系列数や長さの制約が少ない。

ZCZ 系列の本数は理論的上限に等しいことが望ましいが、本数以外で優れた特徴を示す系列の場合、系列本数が最適理論値よりも 1 ないしは 2 本少ないものも対象とした。これは、系列セットの系列本数が十分多い場合には、本数が 1, 2 本少なくとも、相関関数特性が優れている方が、応用上好ましいからである。

生成された系列セットの応用については、CDMA などの通信だけではなく、超音波イメージング、電子透かし、ステガノグラフィへの応用の検討も行うことにより、系列の応用範囲の拡大や新たな性質を持った系列セットの発見を試みた。本研究では、単に生成法や応用法を開発するだけでなく、本研究の成果が、新しい系列など他の研究に発展できるように心がけた。

本研究の 1 番目の特色は、差集合、ラテン格子、完全系列、アダマール行列、 M 系列などを多様に組合せた系列生成方法である。組合せ方を変えることによって、系列本数、系列長、零相関範囲を変えずに、零相関範囲外の相関関数のピーク値などを変えることができる。他の ZCZ 系列研究者による研究のほとんどは、零相関範囲外の相関関数について検討していない。特に、零相関範囲外の相関関数のピーク値を制御する方法については、本報告時点でも少数の報告にとどまっ

ている。

本研究の2番目の特色は、研究代表者による低ピーク比疑似白色雑音系列の研究と ZCZ 系列研究の融合という点である。この低ピーク比疑似白色雑音によって、ZCZ 系列の構成方法などを検討した。本課題では、上記研究の融合によって、より新しい ZCZ 系列の開発を進めるとともに、ZCZ 系列についての周波数特性についても研究を進める。

本研究の3番目の特色は、従来の ZCZ 系列の検討が無線や光通信などの通信への応用が中心であるのに対して、本研究課題では、無線への応用に加えて、超音波イメージングへの応用、電子透かしへの応用などを重点的に行なうことである。応用によって、最適な系列セットは異なる可能性が高い。そのため、それぞれの応用について、シミュレーションを初めとした実験を行なうことが、必要となる。研究代表者は、電子透かしや超音波イメージングへの応用検討を行なってきたため、その成果をいかしながら、新規 ZCZ 系列の開発や性能評価を行なう予定である。

本研究の意義： 種々の方法によって生成される ZCZ 系列の性質を明らかにすることによって、どのような応用にどのタイプの ZCZ 系列を用いるべきかを示すことができるようになる。また、ZCZ 系列を用いた応用システムの性能向上も期待できる。また、いままで明らかでなかった ZCZ 系列の性質をしめすことができれば、ZCZ 系列の新たな応用が可能になるものと期待される。応用システムの性能が向上すれば、通信システムのように直接的な効果が期待されるだけでなく、物理計測などによって、物性研究や生物学、医学研究へも派生的効果が期待される。実際、研究代表者の ZCZ 系列を超音波イメージングへ応用したものは、M 系列などを用いたものよりも、高い性能が出ている。

種々の ZCZ 系列生成法の数理的特徴を比較検討することによって、ZCZ 系列に限らず、広く系列生成法研究の発展に寄与することができるものと考えている。研究代表者のいままでの研究でも、新しい系列生成を発見したあとで、その生成法の数理的検討が、さらに新しい系列の発見につながっている。ZCZ 系列の数理的研究およびその応用によって、様々な工学分野の研究開発に寄与することが本研究の大きな目的の一つである。

3. 研究の方法

本研究の目的は、研究代表者の考案した 10 数種類の ZCZ 系列生成法をもとにして、

(1) 理論的上限に等しいか、それに近い系列

数を有している。

(2) 非周期、周期、奇相関の全てに対応して零相関範囲を有している。

(3) 零相関範囲外のピーク値が小さい

(4) 系列の要素のほとんどが非零要素(1 か -1) で、零要素が少ない。

(5) 生成できる系列数や長さの制約が少ない。を満たす系列生成方法と、これらの要求項目をできるだけ多く満たす系列の生成方法を発見を行うことであり、研究代表者などが発表している系列や新規系列の数理的性質を明らかにすることにある。

ZCZ 系列は、その生成方法によって異なった性質を示す事がある。特に、零相関範囲外の相関関数の振る舞いは、生成法等によって、大きく変化する。そのため、ZCZ 系列の相関関数に関する様々な性質を明らかにすることは、ZCZ 系列の工学的応用を検討するためにも重要である。特に、零相関範囲外でも相関関数が小さくなるような生成方法を見つければ、ZCZ 系列を応用したシステムの性能を向上させる事ができる。また、その様な系列生成方法を見つけることは相関関数を制御する新しい方法など他の工学分野に応用できる基礎技術の発見も目指す。

以下に、この目的を果たすための研究計画と方法を示す。

研究方法本研究では、

- ・ 系列の生成方法の検討。
- ・ 系列の性質の的検討。
- ・ 系列のあたらしい応用方法（応用原理）の検討。

などの理論的検討と、

- ・ 自作のソフトウェアを用いた応用システムの性能評価。
- ・ 信号処理及び通信システム設計シミュレーションソフトウェア (MATLAB) を用いた用システムの設計と評価。

といった実験を行いながら研究を進めた。

系列の生成方法の検討については、研究代表者による種々の ZCZ 系列生成法比較することで、系列生成方法の見直しを行う。見直しにあたっては、零相関範囲外の相関関数の値、特にピーク値を小さくする事を第一の目標とする。ZCZ 系列は同じ生成方法でもその原料となる系列の選び方によって、ピーク値などが大きく変わる。そこで、理論的検討に加えて、計算機探索も行なって生成された ZCZ 系列の零相関範囲外の相関関数の値が低くなるような組合せ（生成方法と原料系列）の発見を試みる。

MATLAB などを用いたシミュレーションと簡単な実験も行う予定である。無線 LAN への 3 値 ZCZ 系列の応用は、自作ソフトや MATLAB を用いたシミュレーションを行いながら性能の評価や改良点の検討を行った。

ZCZ 系列用の CDMA 対雑音性評価ソフトなども自作した。

4. 研究成果

3 年間の研究の中で、10 種類の新たな系列生成方法とを発見し、それらについて理論的検討と応用方法の検討を行った。得られた結果は、学術雑誌を中心に発表を行った。

2007 年度の主な成果：

2007 年度は、新規系列生成方法の検討を主に行った。この年度には、いくつかの系列生成方法を考案・発見したが、主なものとしては、

- (1) 研究代表者が発表したいいくつかの 2 値零相関系列生成方法を統合したより一般的な 2 値 ZCZ 系列セット生成方法を考案した。アダマール行列から 2 値零相関系列セットを生成する方法を拡張して、同じやり方で 2 値の相補系列からも 2 値零相関系列セットを生成できるようにした。長さ L の $2K$ 本からなる相補系列セットと $2K$ 個の大きさ $n \times n$ のアダマール行列によって、 $2Kn$ 本の ZCZ 系列からなる系列セットが生成される。パラメータ $m \geq 0$ に対して、系列の長さは、 $2^{m+2}KLn$ で、零相関範囲は、 -2^mL から 2^mL である。ZCZ 系列の系列数の理論的限界値と実際の系列数の比は、 $1/2+1/(2^{m+1}L)$ である。2 値 ZCZ 系列セットでは、零相関範囲と系列本数の積を系列長で割った値が $1/2$ を越えないことがわかっていて、この値が $1/2$ となる系列セットが事実上の optimal な 2 値 ZCZ 系列セットといえる。提案手法による系列セットはこの条件を満たしており、optimal な 2 値 ZCZ 系列セットとなっている。
- (2) 通常の周期的相関関数で、自己相関の side-lobe が全て 0 となる系列を perfect sequence または、even-perfect sequence と呼ぶ。ある系列の奇相関関数とは、系列の周期ごとに符号を反転させたものについての相関関数である。奇自己相関関数で、side-lobe が全て 0 となる系列を odd-perfect sequence と呼ぶ。同一周期をもつ even-perfect sequence と odd-perfect sequence を用いて ZCZ 系列セットを生成する方法を発見した。
- (3) 長さ kn の even-perfect sequence と odd-perfect sequence から、長さ $4kn$ で、系列の本数が $2n$ 、零相関範囲が $-(2k-1) \sim (2k-1)$ となる ZCZ 系列セットが生成される。even-perfect sequence と

odd-perfect sequence を組み合わせた系列生成方法は従来には無かった方法である。生成された ZCZ 系列の系列本数は理論的上限に一致していて、提案系列セットは optimal ZCZ 系列である。

- (4) Perfect sequence から ZCZ 系列セットを生成する方法はいくつか発表されているが、従来にない系列構成方法を発見した。長さ $k(2n+h)$ for $k \geq 1, n \geq 2, h = 1, \text{ or } h = 2$ となる perfect sequence から、パラメータ $m (m \geq 0)$ に対して、長さ $(2^{m+1}k(2n+h))$ 、本数 $2n$ 、零相関範囲が、 $-(2^{m+1}k-1) \sim (2^{m+1}k-1)$ となる ZCZ 系列セットの生成方法を発見した。生成される系列の本数は、理論的上限值よりも h 本だけ低い。系列本数が、理論的上限よりも $1 \sim 2$ 低いという代償によって、生成される系列の本数の自由度を高めた。すなわち、パラメータ $m (m \geq 0)$ によって、長さを $(2^{m+1}k(2n+h))$ のように、伸ばすことができる。これによって、応用での自由度を高めた。Perfect sequence を用いて生成される ZCZ は従来、生成される系列の長さの制約が厳しかったが、提案手法で自由度をあげることに成功した。

2008 年度の主な成果

2008 年度は、完全系列や相補系列を用いた系列生成方法の検討を中心に進めた。ZCZ 系列セットについて、CDMA への応用方法とその性能評価を行うことができた。また、疑似白色雑音系列を用いた零相関範囲系列の新しい生成方法を開発することができた。実際の応用では、ある特定の系列ペアが、その他の系列ペアよりも相互相関の零相関範囲が長いことが要求されるが、この要求を満たす系列生成方法が未解明であることから、その生成方法の検討を行った。

- (1) 長さ L の Golay complementary sequence pair と長さ $k(2n+h)$ for $k \geq 1, n \geq 2, h = 1, \text{ or } h = 2$ となる perfect sequence から、長さ $2Lk(2n+h)$ 、本数 $2n$ 本、位相差が $-(2kL-1)$ から $(2kL-1)$ の範囲で相関関数の値が 0 となる 3 値 ZCZ 系列セットの生成方法を発見した。2007 年度の ZCZ 系列セットと同様に、生成された系列セットの本数は、理論的上限值よりも、 h 本だけ低い。しかしながら、Golay complementary sequence pair と perfect sequence を組み合わせることにより、従来にない多様な ZCZ 系列を生成することを可能にした。Approximately synchronized CDMA (AS-CDMA) への応用なども検討を行っ

- た。
- (2) 長さ $(2n+1)(2k+1)$ for $k \geq 1$ and $n \geq 1$ の perfect sequence から ZCZ 系列セットを生成する方法を発見した。従来の ZCZ 系列セットは、零相関範囲 (Zero-Correlation Zone) の外側に相関関数が大きなピーク値を持つてしまうことがあった。理論的な設計上は、これらのピークは応用面でも問題とならない。しかしながら、実際のシステムに適用する場合には、零相関範囲外の相関関数のピーク値も低くすることが望ましい。本提案手法では、零相関範囲外のピーク値が系列のパワー（位相差 0 の自己相関関数の値と同じ）の半分以下に抑えることができる。探索法ではなく、系統的に零相関範囲外のピーク値を抑えるという点で従来にない成果である。本方法によって、得られる系列セットは、長さ $2(2n+1)(2k+1)$ 、本数 $4n+2$ で、位相差 $-2k \sim 2k$ で相関関数の値が 0 となり、系列本数は、理論的上限值に等しい。つまり、本提案手法が生成する ZCZ 系列セットは、optimal ZCZ 系列である。
- (3) Perfect sequence などから ZCZ 系列を生成し、その系列セットを用いた超音波イメージングの検討を集中的に行った。具体的には、ZCZ 系列セットの相関関数特性を用いて合成開口イメージングの手法で対象物についての情報を可視化するものである。従来の超音波イメージングの研究では主に M 系列が用いられているが、それらに比べて解像度の高いイメージを得ることができた。

2009 年度の主な成果

2009 年度は完全系列を用いた零相関系列生成方法の一般化をさらに進めることができた。また、最終年度にあたり、次年度以降につながる、全く新しいタイプの系列生成方法をいくつか発見することができた。

- (1) 長さが 2 つの奇数の積 $((2k+1)(2n+1))$ for $k \geq 1$ and $n \geq 0$ に等しい perfect sequence を用いた ZCZ 系列セット生成方法を発見した。この系列生成法によって生成される ZCZ 系列は、系列の長さが $4(2k+1)(2n+1)$ で、系列本数が、 $2(2n+1)$ 、位相差 $-(4k+1) \sim (4k+1)$ で相関関数の値が 0 となる。CDMA への応用について、他の手法による ZCZ 系列や GMW 系列などとの性能比較も行った。そのために、新たなシミュレーションソフトも作成した。
- (2) Perfect sequence を用いた ZCZ 系列セット生成方法は、研究代表者も含めて、様々

な方法が提案されている。研究代表者が 2006 年に発表した生成方法を拡張・一般化した系列生成方法を考案・発見した。様々な長さの perfect sequence から柔軟に ZCZ 系列セットを生成できるようになった。

- (3) 新たな低ピーク疑似白色雑音系列生成方法を発見した。これは、2000 年に研究代表者らが発表した系列生成方法の拡張にあたる。以前の手法では、 n 次のアダマール行列に対して、長さ $2n^2$ となる系列だけが生成できたが、 n 次のアダマール行列が存在しないような n についても低ピーク疑似白色雑音系列セットを生成できるようになった。

従来の ZCZ 系列セットは、系列セット全体での零相関範囲だけが議論されてきた。しかしながら、多くの応用で、系列セットの中にサブセットを作り、サブセット間での零相関範囲が同一サブセット内での零相関範囲よりも広いことが求められる。本研究課題の最終年度になって、このような条件を満たす ZCZ 系列セット生成方法を複数発見することができた。現在、それらを整理しながら、いくつかについて論文投稿中である。この新しいクラスの ZCZ 系列について、より深く広く研究を進めていく予定である。

4. 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 6 件)

- ① Takafumi Hayashi, "A Class of Zero-Correlation Zone Sequence Set Using a Perfect Sequence," IEEE Signal Processing Letters, 16, 2, pp. 331-334, 2009
- ② Takafumi Hayashi, "Zero-Correlation Zone Sequence Set Constructed from a Perfect Sequence and a Complementary Sequence Pair," IEICE Trans. Fundamentals, E91-A(7), pp.1676-1681, 2008
- ③ Takafumi Hayashi, "A Novel Class of Zero-Correlation Zone Sequence Sets Constructed from a Perfect Sequence," IEICE Trans. of Fundamentals Vol.E91-A(4), pp.1233-1237, 2008
- ④ Takafumi Hayashi, "An Integrated Sequence Construction of Binary Zero-Correlation Zone Sequences," IEICE Trans. of Fundamentals, E90-A(10), pp.2329-2335, 2007

- ⑤ Takafumi Hayashi, "Zero-Correlation Zone Sequence Set Construction Using an Even-Perfect Sequence and an Odd-Perfect Sequence," IEICE Trans. Fundamentals, E90-A(9), pp.1871-1875, 2007
- ⑥ Takafumi Hayashi, "Zero-Correlation Zone Sequence Set Constructed from a Perfect Sequence," IEICE Trans. Fundamentals, E90-A(4), pp.1107-1111, 2007

[学会発表] (計 4 件)

- ① Takafumi Hayashi, Shinya Matsufuji, "A Generalized Construction of Optimal Zero-Correlation Zone Sequence Set from a Perfect Sequence," Proc. of IWSDA09, 2009
- ② Shinya Matsufuji, Takahiro Matsumoto, Tomohiro Hayashida, Takafumi Hayashi, Noriyoshi Kuroyanagi, and Pingzhi FAN, "On a ZCZ Code Including a Sequence Useful for Synchronization," Proc. of IWSDA09, 2009
- ③ Takafumi Hayashi, Yuichi Takahashi, Shigeru Kanemoto, "An Novel Optimal Zero-Correlation Zone Sequence Set and Its Application to Ultrasonic Imaging," SICE 2008
- ④ Takafumi Hayashi, "Optimal Zero-Correlation Zone Sequence Set Constructed from a Perfect Sequence," Proc. of the 7th IEEE international Conference on Computer and information Technology (October 16 - 19, 2007). CIT. IEEE Computer Society, pp.475-479.

[その他]

ホームページ等

<http://www.u-aizu.ac.jp/%7etakafumi/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 隆史 (HAYASHI TAKAFUMI)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：20218580