

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007 年度～2008 年度  
 課題番号：19760268  
 研究課題名 (和文) 三相 ZCZ 系列とその CDMA システムへの応用に関する研究  
 研究課題名 (英文) A research on three-phase ZCZ sequences and their application to CDMA systems  
 研究代表者  
 鳥井 秀幸 (TORII HIDEYUKI)  
 神奈川工科大学・情報学部・准教授  
 研究者番号：20343642

## 研究成果の概要：

本研究では、次世代の移動体通信システムの実現を目指して、新しい CDMA 用拡散系列である三相 ZCZ 系列の構成方法およびその特性についての研究を行った。本研究により、セルラー方式の CDMA システムに適した特性を持つ、具体的には、他の端末からの干渉を小さく抑制できるような三相 ZCZ 系列の構成方法が明らかとなった。得られた成果は、次世代の CDMA システムの設計に有用であると考えられる。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	600,000	0	600,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,500,000	270,000	1,770,000

## 研究分野：無線通信理論

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：近似同期 CDMA, 三相 ZCZ 系列, 符号化三相位相変調, 相互相関関数, 拡散系列, セル間干渉

## 1. 研究開始当初の背景

携帯電話等の公衆移動通信システムにおける主要な標準技術の一つとして、CDMA 方式が広く実用化されている。移動通信システムの性能は様々な要素に依存して決まるが、CDMA 方式の性能を決定する主要な要素の一つとして、拡散系列の相関特性が挙げられる。研究代表者は、以前より拡散系列の研究に従事しており、特に次世代 CDMA として注目されている近似同期 CDMA 用拡散系列である

ZCZ (Zero-Correlation Zone) 系列について研究成果を数多く得ている。ZCZ 系列とは、ある特定の範囲内の位相シフトにおいて、自己相関関数がインパルス的であり、相互相関関数が 0 となるような系列の集合のことである。この理想的な相関特性が保証される位相シフトの範囲は、零相関範囲と呼ばれている。一般に ZCZ 系列は、零相関範囲の大きさ、集合に属する系列の個数、系列の周期の三つのパラメータで特徴付けられる。

デジタル変調において、BPSK および QPSK は、非常に優れた誤り率特性を持つことが広く知られている。一方、三つの位相を使用する PSK 方式である三相位相変調方式 (TPSK) は、従来あまり注目されてこなかった。しかし、TPSK の誤り率は、 $E_b/N_0$  が 4.86dB を超える領域で、BPSK および QPSK よりも小さくなる。さらに、TPSK は、 $\pi/4$  シフト QPSK よりも瞬時振幅変動が少ないため、非線形増幅器による不要なスペクトルの発生の影響を低減できるという利点を持っている。現実の通信システムでは二元情報を伝送する必要があるため、TPSK においても二元情報を三つの位相に対応させるマッピング回路が必要となる。そこで、研究代表者等は、二元入力三元出力畳込み符号を新たに提案し、TPSK のマッピングにおける問題を解決すると共に、TPSK に優れた誤り訂正能力を付与することに成功した。この方式は、符号化三相位相変調方式と呼ばれる。

移動通信システムに適した特性を持つ符号化三相位相変調方式を近似同期 CDMA システムに応用するためには三相 ZCZ 系列が必要となるが、TPSK と同様に三相拡散系列も従来ほとんど研究されてこなかった。

## 2. 研究の目的

ZCZ 系列を用いる近似同期 CDMA システムでは、各セル内に存在する端末間の同期のずれを零相関範囲内に制御することにより、理想的な相関特性が保証される。すなわち、近似同期 CDMA システムは同一セル内のチャンネル間干渉およびマルチパス干渉を防ぐことが可能である。しかし、現実のセルラーシステムでは、サービスエリアを多数のセルでカバーしており、近隣のセルにある端末からの干渉波を排除することは不可能である。つまり、近似同期 CDMA システムにおいても、セル間干渉を防ぐことは出来ない。このセル間干渉を低減するためには、優れた相互相関特性を持つ異なる ZCZ 系列の組み合わせを近隣のセルに割り当てることが必要となる。したがって、本研究では、符号化三相位相変調方式を近似同期 CDMA へ適用可能にすることを目指すが、ただ単に三相 ZCZ 系列の構成方法を明らかにするのではなく、セルラーシステムへの応用を念頭において、優れた相互相関特性を持つ異なる三相 ZCZ 系列の組み合わせを構成する方法について明らかにすることを目的とする。さらに、従来、主な研究対象とされていた二相および四相 ZCZ 系列と三相 ZCZ 系列との比較も行い、その得失を明らかにする。

## 3. 研究の方法

研究代表者は、以前より CDMA システムへの応用を目的として、拡散系列の設計に関する研究を行ってきた。ZCZ 系列に関しては、現在までに、多相直交系列とユニタリ行列から多相 ZCZ 系列を構成する方法、DFT 行列とユニタリ行列から多相 ZCZ 系列を構成する方法を提案している。これらの ZCZ 系列構成方法では、得られた ZCZ 系列を元にして再帰的に無数の ZCZ 系列を構成することが可能である。これらの ZCZ 系列構成方法において使用される直交系列、ユニタリ行列、DFT 行列が三相の場合、すなわち要素が全て 1 の 3 乗根である場合、三相 ZCZ 系列が得られる。三相直交系列としては、周期 3 および周期 9 のものが存在することが知られている。また、3 次の DFT 行列はその要素が 1 の 3 乗根であるため、明らかに三相 DFT 行列である。なお、三相ユニタリ行列は、三相 DFT 行列とクロネッカー積により生成可能である。以上の検討により、研究代表者が提案した多相 ZCZ 系列構成方法より得られる三相 ZCZ 系列は、使用される直交系列、ユニタリ行列、DFT 行列に依存して 3 種類に分類可能であることが分かる。具体的には、周期 3 の三相直交系列と三相ユニタリ行列を使用するもの、周期 9 の三相直交系列と三相ユニタリ行列を使用するもの、3 次の DFT 行列と三相ユニタリ行列を使用するものの 3 種類に分類できる。以下では、周期 3 の三相直交系列と三相ユニタリ行列から構成される三相 ZCZ 系列を Type1、周期 9 の三相直交系列と三相ユニタリ行列から構成される三相 ZCZ 系列を Type2、3 次の DFT 行列と三相ユニタリ行列から構成される三相 ZCZ 系列を Type3 とそれぞれ呼ぶことにする。

前述のように、ZCZ 系列とは、相関関数に零相関範囲が現れるような系列の集合のことである。近似同期 CDMA では、各セルに 1 つの ZCZ 系列が割り当てられる。近似同期 CDMA において、セル間干渉を可能な限り低減するためには、相互相関特性に優れた ZCZ 系列の組を近隣のセルに割り当てる必要がある。そこで、互いに異なる ZCZ 系列に含まれる系列間の相互相関関数について検討を行う。相関関数の評価尺度としてはいくつかの考え方が存在するが、本研究では相関関数の絶対値の最大値、いわゆる尖頭値に注目する。相関関数の尖頭値は、2 つの端末間の干渉量の最大値と関連するパラメータであり、CDMA 用拡散系列を評価する場合に最も重要視される尺度である。本研究においては、互いに異なる ZCZ 系列に含まれる系列間の全ての組み合わせにおいて、尖頭値の最大値が小さくなるような ZCZ 系列の組み合わせを構成する方法について検討を行う。前述のように、研究代表者が提案した多相 ZCZ 系列は、多相直交系列およびユニタリ行列、または DFT 行列

およびユニタリ行列を元にして再帰的に構成されている。したがって、互いに異なる三相 ZCZ 系列に含まれる系列間の相互相関関数も、再帰的に分解することが可能であると予想される。具体的には、互いに異なる Type1 三相 ZCZ 系列間の相互相関関数は、周期 3 の三相直交系列間の相関関数と三相ユニタリ行列の各行間の相関関数によって表されると考えられる。同様に、Type2 三相 ZCZ 系列の場合は周期 9 の三相直交系列間の相関関数と三相ユニタリ行列の各行間の相関関数によって、Type3 三相 ZCZ 系列の場合は 3 次の DFT 行列の各要素の関数と三相ユニタリ行列の各行間の相関関数によって表されると考えられる。このように、互いに異なる三相 ZCZ 系列に含まれる系列間の相互相関関数を再帰的に分解することにより、尖頭値が小さくなるような三相 ZCZ 系列の組み合わせを構成するための基準を明らかにする。

Type1~Type3 の三相 ZCZ 系列間の相互相関特性を明らかにした後、それらの成果をもとに Type1~Type3 の三相 ZCZ 系列間の得失について検討を行う。なお、一般に、拡散系列の周期が長くなると相互相関関数の尖頭値も大きくなる傾向がある。したがって、周期の異なる系列間における得失を論ずる場合は、尖頭値そのものではなく、拡散系列の周期に対する尖頭値の比率を評価尺度として使用するのが適切である。本研究では、この比率を  $\mu$  と表し、Type1~Type3 の三相 ZCZ 系列間の得失の検討における評価尺度とする。また、近似同期 CDMA では、各端末から基地局への上り回線において、緩やかな同期の確立が必要とされる。ZCZ 系列における零相関範囲は、この同期のずれの許容量と関連するパラメータであり、近似同期 CDMA への応用を考える場合は非常に重要なものである。したがって、この観点からも Type1~Type3 の三相 ZCZ 系列間の得失について検討を行う。一般に、零相関範囲も拡散系列の周期が長くなるにしたがって大きくなる傾向がある。よって、零相関範囲の長さそのものではなく、拡散系列の周期に対する零相関範囲の長さの比率を評価尺度として使用する。なお、本研究では、この比率を  $\eta$  と表す。以上の 2 つの比率  $\mu$  と  $\eta$  を評価尺度とし、Type1~Type3 の三相 ZCZ 系列のいずれが、符号化三相位相変調方式を用いた近似同期 CDMA 用拡散系列として最も適したものであるかについて明らかにする。

#### 4. 研究成果

最初に、Type1 三相 ZCZ 系列における成果について述べる。互いに異なる Type1 三相 ZCZ 系列に含まれる系列間の相互相関関数を、元となる周期 3 の三相直交系列間の相関関数お

よび三相ユニタリ行列の各行間の相関関数の関数として表すことに成功した。また、この結果より、相互相関特性に優れる Type1 三相 ZCZ 系列の組を構成するためには、相互相関関数の尖頭値が小さい周期 3 の三相直交系列の組を選択することが重要であることが明らかとなった。周期 3 の三相直交系列は全部で 18 種類存在し、それらの間の相互相関関数の尖頭値は、 $\sqrt{3}$  または 3 となる。このとき、最大値が  $\sqrt{3}$  となる周期 3 の三相直交系列の組み合わせを選択すると、構成される Type1 三相 ZCZ 系列間の相互相関関数の尖頭値に関する上界は  $3^n\sqrt{3}$  となることも明らかとなった。ここで、 $n$  と 1 は自然数である。また、構成される Type1 三相 ZCZ 系列の周期は  $3^{n+1}$  と表されるので、系列の周期に対する尖頭値の上界の比率は  $\mu = \sqrt{3}/3$  となる。さらに、Type1 三相 ZCZ 系列の零相関範囲の長さは  $3^n$  と表されるので、系列の周期に対する零相関範囲の長さの比率は  $\eta = 1/3$  となる。

次に、Type2 三相 ZCZ 系列における成果について述べる。互いに異なる Type2 三相 ZCZ 系列に含まれる系列間の相互相関関数を、元となる周期 9 の三相直交系列間の相関関数および三相ユニタリ行列の各行間の相関関数の関数として表すことに成功した。また、この結果より、相互相関特性に優れる Type2 三相 ZCZ 系列の組を構成するためには、相互相関関数の尖頭値が小さい周期 9 の三相直交系列の組を選択することが重要であることが明らかとなった。周期 9 の三相直交系列は全部で 162 種類存在し、それらの間の相互相関関数の尖頭値は、3 または  $3\sqrt{3}$  または 9 となる。このとき、最大値が 3 となる周期 9 の三相直交系列の組み合わせを選択すると、構成される Type2 三相 ZCZ 系列間の相互相関関数の尖頭値に関する上界は  $3^{n+1}$  となることも明らかとなった。また、構成される Type2 三相 ZCZ 系列の周期は  $3^{n+2}$  と表されるので、系列の周期に対する尖頭値の上界の比率は  $\mu = 1/3$  となる。さらに、Type2 三相 ZCZ 系列の零相関範囲の長さは  $7 \cdot 3^n$  と表されるので、系列の周期に対する零相関範囲の長さの比率は  $\eta = 7/9$  となる。

最後に、Type3 三相 ZCZ 系列における成果について述べる。Type3 三相 ZCZ 系列を構成する場合には、3 次の DFT 行列の各行の並べ替えが行われる。この並べ替えという操作は、0, 1, 2 の順番を並べ替える置換を用いて表すことが可能である。互いに異なる Type3 三相 ZCZ 系列に含まれる系列間の相互相関関数を、3 次の DFT 行列の各要素と使用される置換の関数および三相ユニタリ行列の各行間の相関関数の関数として表すことに成功した。また、この結果より、相互相関特性に優れる Type3 三相 ZCZ 系列の組を構成するためには、使用される 2 つの置換の間にある特定

の関係が成立する必要があることも明らかとなった。この関係が成立するとき、構成される Type3 三相 ZCZ 系列間の相互相関関数の尖頭値に関する上界は  $3^{nl}$  となることも明らかとなった。また、構成される三相 ZCZ 系列の周期は  $3^{nl+1}$  と表されるので、系列の周期に対する尖頭値の上界値の比率は  $\mu = 1/3$  となる。さらに、Type3 三相 ZCZ 系列の零相関範囲の長さは  $2 \cdot 3^{nl}$  と表されるので、系列の周期に対する零相関範囲の長さの比率は  $\eta = 2/3$  となる。

比率  $\mu$  は異なるセルに存在する 2 つの端末間の干渉量の最大値と関連するパラメータであるので、その値が小さいことが望まれる。一方、比率  $\eta$  は上り回線における各端末間の同期のずれの許容量と関連するパラメータであるので、その値が大きいことが望まれる。以下の表 1 は、Type1~Type3 の三相 ZCZ 系列における  $\mu$  および  $\eta$  をまとめたものである。比率  $\mu$  に関しては、Type2 および Type3 三相 ZCZ 系列の  $1/3$  が最小値である。また、比率  $\eta$  に関しては、Type2 三相 ZCZ 系列の  $7/9$  が最大値である。前述の通り、比率  $\mu$  の値は小さいことが望ましく、比率  $\eta$  の値は大きいことが望ましい。したがって、どちらの観点から考えても、Type2 三相 ZCZ 系列が、符号化三相位相変調方式を用いた近似同期 CDMA 用拡散系列として最も適した特性を有していることが明となった。なお、Type2 三相 ZCZ 系列は、同様の構成方法により得られる二相 ZCZ 系列と比較して、 $\mu$  および  $\eta$  の両方の観点から優れた特性を有していることが分かる。一方、同様の構成方法により得られる四相 ZCZ 系列と比較した場合、 $\mu$  の観点では優れた特性を有しているが、 $\eta$  の値は Type2 三相 ZCZ 系列が小さい。以上より、少なくともセル間干渉を抑制するという観点から考えると、三相 ZCZ 系列は二相および四相 ZCZ 系列よりも有用である可能性が高いといえる。

表 1  $\mu$  および  $\eta$  の比較

	$\mu$	$\eta$
Type1	$\sqrt{3}/3$	$1/3$
Type2	$1/3$	$7/9$
Type3	$1/3$	$2/3$

本研究で得られた研究成果は、符号化三相位相変調方式を用いた近似同期 CDMA システムを設計する場合において、非常に有用であると考えられる。なお、これらの成果については、国際会議で 2 回、国内シンポジウムで 1 回の発表を行った。新規性の観点に関しては、従来全く注目されてこなかった三相 ZCZ 系列に関する初めて研究成果として、一定の評価を得ているものと考えられる。さらに、有用性の観点

に関しては、符号化三相位相変調方式を用いた近似同期 CDMA の実現可能性を示す成果としての評価も得られたと考える。今後は、三相 ZCZ 系列構成方法に関する理論的研究の更なる発展および符号化三相位相変調方式を用いた近似同期 CDMA への応用に関する研究の進展、特に詳細なシステム性能の評価が期待される。

## 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)

[学会発表] (計 3 件)

① Hideyuki Torii, Three-phase ZCZ sequence sets with good cross-correlation properties for CDMA cellular systems, The 13th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, December 15, 2008, Tenerife, Spain.

② Hideyuki Torii, A Study on Three-phase ZCZ Sequence Sets, The 5th WSEAS International Conference on Applied Electromagnetics, Wireless and Optical Communications, December 15, 2007, Tenerife, Spain.

③ 鳥井 秀幸, 三相 ZCZ 系列とその相関特性に関する一検討, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月 28 日, 三重県志摩市阿児町賢島

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鳥井 秀幸 (TORII HIDEYUKI )  
 神奈川工科大学・情報学部・准教授  
 研究者番号 : 20343642

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :