

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18153

研究課題名（和文）CDMA-QAM伝送におけるビット誤り率特性向上手法の確立と鉄道システムへの応用

研究課題名（英文）Establishment of Bit Error Rate Improvement Methods for CDMA-QAM Transmission and Applications in Railway Systems

研究代表者

望月 寛 (MOCHIZUKI, Hiroshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10434119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：鉄道信号システムの多情報化を目的に検討しているCDMA-QAM伝送方式について、その伝送特性向上を図るための誤り訂正手法を提案した。その中で、CDMAに用いられる直交符号の相関特性を用いることで、従来の誤り訂正符号を用いない誤り訂正手法が実現可能であることを明らかにするとともに、CDMA-QAM伝送方式の特徴を踏まえたQAMのシンボル数削減手法や多値PSKの導入などの検討を行った。そして、計算機シミュレーションによる評価を行った結果、雑音環境下においても良好なビット誤り率特性が得られることを確認し、本提案手法の有用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、誤り訂正符号を用いないことやQAMのシンボル数を削減することで効率の良い伝送を実現することが可能となる。そのため、提案方式は十分な伝送帯域を確保できない分野での多情報伝送に対して有用である。特に、デジタルATC（自動列車制御）システムのような鉄道のレールを用いた伝送では現在、レールが持つ周波数特性や鉄道雑音の影響から数百bps程度の伝送速度しか確保できていないため、本手法によって多情報伝送を実現することで、さらに高度な列車制御を実現できる可能性がある。さらに、誤り訂正符号とは独立した誤り訂正手法であるため、誤り訂正符号を用いることで更なる誤り訂正能力の向上を図れる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：CDMA-QAM transmission method has been proposed for realizing high-speed data transmission in railway signaling systems. And a new error correction method to improve transmission characteristics was proposed for this transmission method. In this study, a method in which general error correction codes are not employed by using correlation characteristics of the orthogonal codes was shown. In addition, in order to improve further noise immunity, reduction of number of QAM symbols in which CDMA-QAM transmission characteristics were considered and a new transmission method in which multi-value PSK transmission was employed instead of QAM transmission were also studied. As results of computer simulations, good transmission characteristics were realized, the effectiveness of the proposed method was verified.

研究分野：通信システム

キーワード：CDMA 直交符号 QAM 多値PSK 鉄道信号システム

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本の鉄道信号システムの一つである ATC(Automatic Train Control:自動列車制御)システムは、先行列車との間隔等に応じて地上設備から列車制御に関わる信号を送信し、必要に応じて自動ブレーキをかけ列車の安全運行を実現するシステムである。従来、AM(Amplitude Modulation)によって許容運転速度を送信するアナログ ATC システムが用いられていたが、近年、地上設備から送られてきた停止位置情報を基に、車上で最適なブレーキパターンを算出するデジタル ATC システムが注目されており、既に首都圏の一部の線区や各新幹線にも導入されている。ここで、デジタル ATC システムでは、先行列車の停止位置情報や天候、線路の勾配等、ブレーキパターンを算出する上で必要な情報をデジタル伝送するため、列車制御の高度化に対してデジタル伝送の多情報化が重要である。また、諸外国における高速鉄道の導入等に代表されるように、近年、鉄道システムの海外展開も重要な課題として挙げられており、このような観点からも本研究に対する重要性が高まってきている。

(2) 今回の伝送媒体であるレールの周波数特性は高周波で大きく減衰する特性を有しており、一般的に数 kHz 程度のオーディオ周波数(Audio Frequency:AF) 帯域が多く用いられていることや、一般の通信系の白色雑音とは異なり、電源周波数 50Hz/60Hz の 6 次高調波である 300Hz/360Hz 周期で大きなピークを持つような特性を有する電気車雑音などの鉄道雑音が存在する。そのため、デジタル ATC システムにおける伝送速度は 300bps 程度に制限されてしまい、システムの拡張において、伝送速度の向上が必要不可欠となっている。

(3) 先行研究として、振幅成分と位相成分の両方を用いて多情報伝送を実現するデジタル変調方式である QAM(Quadrature Amplitude Modulation:直交振幅変調)を採用するとともに、QAM は耐雑音性で不利という点を考慮し、多重化技術の一つである CDMA(Code Division Multiple Access:符号分割多重接続)を併用した CDMA-QAM 伝送方式を採用した鉄道信号システムを提案して成果を上げている①。この CDMA-QAM 伝送方式においては、QAM のシンボル配置の最適化を行うことや CDMA の拡散符号として採用している直交符号の相関特性を利用することで、更なる BER(Bit Error Rate ビット誤り率)特性を向上できる可能性があることが示されており、今後の研究課題として挙げられていた。

2. 研究の目的

(1) 先に示した CDMA における直交符号の相関特性を用いた誤り訂正機能を実現する手法を確立する。特に、先行研究においては 1 ビット誤りに対して有効であることを明らかにしているが、複数ビット誤りに対して誤り訂正機能を向上させる手法について検討した。

(2) 耐雑音性や伝送効率の向上を目的として、最適な QAM のシンボル配置について明らかにする。先行研究では、I 相のシンボル間隔を Q 相のそれより広くすることで BER 特性が向上できることを明らかにしたが、CDMA 多重化信号の振幅分布の不均一性を利用したシンボル数削減や耐雑音性に優れたシンボル配置について検討するとともに、レールが持つ減衰特性に配慮して振幅成分を用いない多値 PSK を導入した新しい伝送方式についてもあわせて検討した。

3. 研究の方法

(1) CDMA における直交符号の相関特性を用いた誤り訂正機能では、各チャネルに対して誤り訂正を行った際のノルム特性から誤り箇所を特定する手法となっているが、何ビットの誤りまでこのノルム特性の線形性が維持されるかについて、まず計算機シミュレーションで確認した。そして、この結果に基づき、実際に複数ビット誤りを発生させた際の誤り訂正能力について明らかにした。

(2) QAM シンボルの最適化については、CDMA-QAM 伝送方式におけるシンボルの不均一性を明らかにした上で、出現頻度の低いシンボルを削減しても BER 特性に影響がないことを計算機シミュレーションによって明らかにした。また、シンボル数削減に伴い振幅成分を用いない多値 PSK の導入可能性が出てきたため、それについてもあわせて検討することとした。

(3) 実際に CDMA-QAM 伝送方式、および CDMA-PSK 伝送方式に対して雑音を付加した時の BER 特性を計算機シミュレーションで評価した。

4. 研究成果

(1) CDMA における直交符号の相関特性を用いた誤り訂正能力について検討を行った。CDMA-64QAM では、64 行のアダマール行列から生成される 64 チャネルの直交符号を拡散符号として、これを送信側で 64 チャネルのパラレルデータに乗じた後、足しこみ多重化を行い、その多重化信号を図 1 のように 64QAM の各信号点に割り当てて送信している。この時、受信側では各チャネル n 相関値出力を得ることができるが、実際には雑音による影響を受けるため、送信シンボルと異なったシンボルを受信する可能性がある。ただ、実際には QAM 復調時にシンボルを誤ったとしても、CDMA 復調によって吸収できる範囲内であれば、送信データは誤りなく受信できる特長を有しているため、受信側での符号判定結果に基づいて雑音が含まれていない理想的な相関値である 64 または -64 のいずれかの値を仮定する。そして、その結果と実際の相関値を用いることによって伝送路で影響を受けた雑音を推定する。

ここで、この雑音推定は送信データに基づいて行っているため、この判定が誤っていた場合、当然、雑音推定も間違ったものになる。他方、QAM は受信側において信号波形が最も近いシン

ボルのデータに復調するため、そのシンボル誤りはコンスタレーション上で送信時のシンボルの近くに誤りやすい傾向がある。これら のことを踏まえて、雑音の影響を受ける前後のシンボル間のノルムが小さくなるようなデータパターンが得られるように、受信側でデータビットを1ビットずつ反転させた全65パターンを計算し、最もノルムが小さいパターンをデータとして採用することで、誤り訂正を実現できる。

以上を踏まえて、これを複数ビット誤りに拡張した結果について検討した。図2にはI相対Q相のSER(Symbol Error Rate:シンボル誤り率)をそれぞれ5%、5%及び2%、20%とし、また、ノルム計算としてシンボル誤りが無い場合に加えて、I相方向(±8)に誤った場合のみを考慮したものと、I相方向(±8)とQ相方向(±1)に誤った場合の両方を考慮したものと の2つを比較した時の結果を示す。この図より、誤りビット数の増加に伴いノルム値も増加する傾向を確認した。特に、シンボル誤りとしてI相方向の誤りのみを考慮した場合、誤りビット数が4ビットまでで線形的なノルム特性が得られた。

次に、図2で得られた結果に基づき、複数ビットの誤り訂正機能の実現について検討した。具体的には、前述の手法で1ビットずつ誤り訂正を行いノルム値がしきい値以下になるまで繰り返す手法を採用した。結果を表1に示す。この表より、1伝送あたりの誤りビット数が3ビット以内であれば、確実に誤り訂正が可能であることを明らかにした。これは、図2に示した4ビット誤りまでのノルム特性の線形性から、それより1ビット少ない3ビットまでであれば、誤り発生チャネルとそうでないチャネルとの間に明らかなノルム値の差が出るためであると考えられる。

(2)CDMA-QAM 伝送方式において、CDMAに用いられる直交符号の各系列における1と-1の出現頻度が均等な関係となっており、また、送信データの出現頻度も均等であると仮定すると、CDMAによる拡散変調を行った後に64チャンネルの和を取った場合、その半分である32を中心とした不均一な分布となり、極端に大きな振幅値や小さな振幅値はほぼ出現しない。そこで、多重化信号の出現範囲である図1に示したQAMのシンボル配置において16~47の32種類の信号点のみをマッピングすることで、信号点間距離を広げることができる。さらに、直交符号に含まれる1の数と-1は必ず偶数ずつであるため、64チャンネルの送信データに含まれる1の数が偶数であるとき、多重化信号の振幅値は偶数しか出現しない。そこで、64チャンネルのうち1チャンネルに平衡ビットを挿入することで1の数を偶数に固定でき、奇数シンボルの信号点を削除し、図3に示すような通常の64QAMの1/4である16QAMで実現できることを明らかにした。

さらに、シンボル数を16まで削減できたことによって多値PSKの適用可能性も出てきたと考えた。今回の伝送媒体であるレーザは強い減衰特性を持つことから、振幅成分を持たない多値PSKを適用できるメリットは大きいと考え、図4のようなシンボル配置もあわせて提案した。

(3)(2)で示したシンボル配置に基づき、提案する誤り訂正符号機能にあわせた際のBER特性について評価した。ここで、CDMA-QAM伝送方式ではI相とQ相の1シンボル誤りは同じ重みを持たないことから、I相とQ相のシンボル間隔比を最適化することで誤り率特性の向上を図ることが明らかにされている。このことを考慮して、計算機シミュレーションではI相と

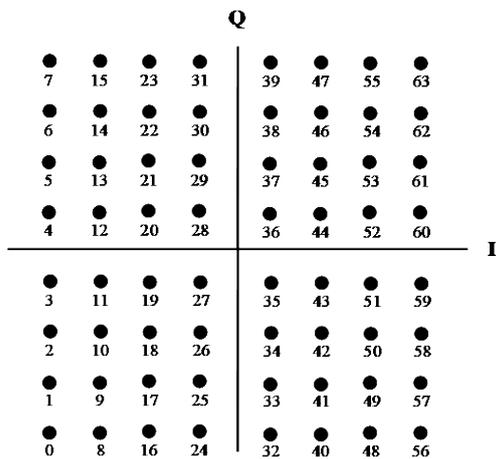


図1 CDMA-QAMにおけるシンボル配置

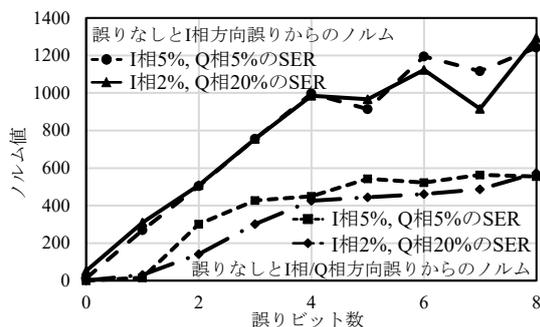


図2 誤りビット数に対するノルム特性

表1 提案した誤り訂正機能の評価

| 1伝送あたりの誤りビット数 | 頻度 | 誤り訂正成功率[%] | 誤り検出成功率[%] | 訂正前誤りビット数 | 訂正後誤りビット数 |
|---------------|--------|------------|------------|-----------|-----------|
| 0 | 88630 | - | - | 0 | 0 |
| 1 | 2776 | 100.00 | 100.00 | 2776 | 0 |
| 2 | 3893 | 100.00 | 100.00 | 7786 | 0 |
| 3 | 2775 | 100.00 | 100.00 | 8325 | 0 |
| 4 | 1182 | 55.25 | 99.75 | 4728 | 2128 |
| 5以上 | 744 | 23.79 | 88.71 | 4220 | 3535 |
| 計 | 100000 | 90.36 | 99.23 | 27835 | 5663 |

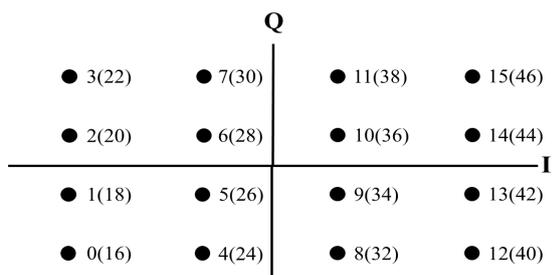


図3 CDMA-16QAMのシンボル配置

Q 相のシンボル間隔比を 3:1 として検討を行った。その BER 特性を図 5 に示す。なお、図中の EC は前述の誤り訂正機能を付加した際の特性を示す。この図より、 E_b/N_0 が 10dB 以上の環境において、誤り訂正機能を用いた伝送方式は、他の方式に比べて良好な BER 特性が得られることを確認した。また、 E_b/N_0 が低い伝送、及び高い伝送においては誤り訂正機能を用いた手法とそうでない手法で大きな BER 特性の差異が見られない。このことについて考察すると、 E_b/N_0 が低い伝送においては 1 伝送あたりの誤りビット数が多く、提案する雑音推定が困難となるため BER 特性が向上しないと考えられ、また、 E_b/N_0 が高い伝送においては誤り訂正機能を用いなくても CDMA-QAM のシンボル間隔比と CDMA の逆拡散処理でビット誤りを吸収できてしまったため、BER 特性に差異がなかったと考えられる。

一方、CDMA-PSK 伝送方式では、図 4 中における 0 と 15 間でのシンボル誤りが BER 特性に大きく影響を与えるため、多重化信号を 1~14 の範囲に丸め込んだ上で計算機シミュレーションを行った。その結果を図 6 に示すが、この図より BER 特性は 16PSK の理論値と比較して良好な特性を得たため、CDMA の逆拡散処理による効果が大いことが確認できた。ただし、誤り訂正機能の有無による変化は見られないため、今後 16PSK に適したノルム算出アルゴリズムを検討する必要があると考えられる。

<引用文献>

①伊藤裕希, 望月寛, 中村英夫, 石川了, 佐野実, 西田賢史, 軌道回路伝送を目的とした CDM-QAM 伝送装置の開発と評価, 電気学会論文誌, Vol.135-D, No.7, 2015, 444-450

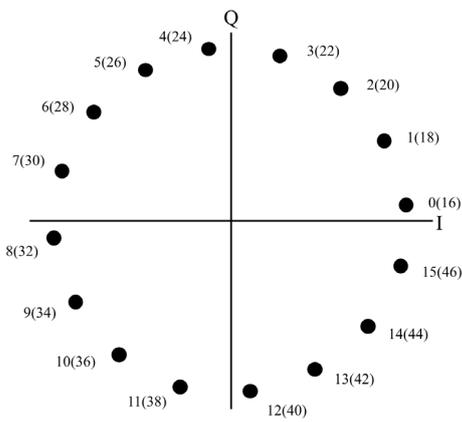


図 4 CDMA-16PSK のシンボル配置

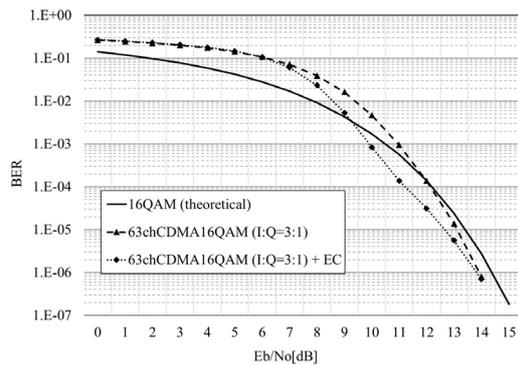


図 5 CDMA-16QAM の BER 特性

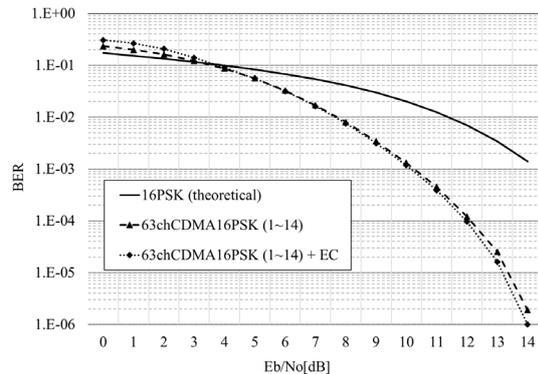


図 6 CDMA-16PSK の BER 特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Mochizuki, H. Nakamura |
| 2. 発表標題 Evaluation of an error correction function using correlation characteristics of spread codes in CDMA-based transmission methods |
| 3. 学会等名 2nd International Joint Conference on Metallurgical and Materials Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Nagato, H. Mochizuki, H. Nakamura, R. Ishikawa, M. Sano and S. Nishida |
| 2. 発表標題 Fundamental Study on Optimization of CDMA-QAM method for Railway Signaling Systems |
| 3. 学会等名 32nd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | | | |