

平成21年 5月25日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760265

研究課題名 (和文) CDMA-QAM 方式を用いた鉄道信号用デジタル多情報伝送装置の開発

研究課題名 (英文) Development of High-capacity Digital Data Transmission System Using CDMA-QAM method for Railway Signaling

研究代表者

望月 寛 (MOCHIZUKI HIROSHI)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号：10434119

研究成果の概要：鉄道信号による列車制御システムとして、ATC (自動列車制御)システムが広く用いられているが、近年、データ伝送をベースとしたデジタル ATC が注目されている。今回、コスト面や妨害波の影響を受けにくい点で有利であるレールを媒体とした伝送を検討した。変調方式として、携帯電話などで使用されている CDMA と無線 LAN などを使用されている QAM とを組み合わせた CDMA-QAM 方式を提案し、そのハードウェアを開発した。また、実際のレールを用いたフィールド試験による性能評価も行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	210,000	2,610,000

研究分野：通信システム、組み込みシステム

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：鉄道信号、CDMA、QAM、DSP、FPGA

1. 研究開始当初の背景

鉄道信号による列車制御システムとして、ATC (Automatic Train Control：自動列車制御)システムが広く用いられているが、近年、データ伝送をベースとしたデジタル ATC が注目されている。伝送媒体としてレールを用いているがこれは、無線方式などと比べて、情報のセキュリティ確保や意図的な外乱対策などシステムの安全性確保への配慮が比較的容易にとれるといった利点

を持ち、また、レールという既存のインフラを用いるため、増設する設備が比較的軽微であるというコスト面での優位性も持っている。しかし、その一方で、伝送帯域としてオーディオ周波数帯しか用いることができない点や、本来、情報伝送を想定して作られていないため、劣悪な雑音環境下で伝送を行わなければならないなどの問題点があり、その伝送速度は、200～300bps 程度が限界とされている。

デジタル ATC システムにおける伝送速度の向上は、システムの高機能化を実現するために必要不可欠であり、それを実現したならば、指令業務の伝達や設備の状態を反映させた列車制御など従来の保安制御の概念を大きく変える可能性を有している。

2. 研究の目的

前述の研究背景に基づいて、変調方式の改善による伝送速度の拡大を図る。そして、レール伝送に適した変調方式として、同一周波数帯でも任意の拡散符号間の直交性を利用し多元接続を実現でき、現在、携帯電話などで広く用いられている CDMA (Code Division Multiple Access : 符号分割多重接続) と、振幅の多値化と位相の多値化とを併用し、多情報化を図る変調方式として現在、無線 LAN など用いられている QAM (Quadrature Amplitude Modulation : 直交振幅変調) とを組み合わせさせた CDMA-QAM 方式を提案する。図 1 にそのブロック図を示すが、本方式は、CDMA により多重化された信号を QAM の各シンボルに割り当てて伝送を行う方式である。具体的には、送信データを 63 のパラレルデータに変換し、各チャンネルで拡散符号による拡散変調を行う。その後、全てのチャンネルを足し合わせ多重化し、その時に得られる 0~63 までの 64 値の振幅値を 64QAM の各シンボルに割り当てる。受信部では、64QAM 復調を行った後に、拡散符号により逆拡散を行い、パラレルデータをシリアルデータに変換して受信データとなる。

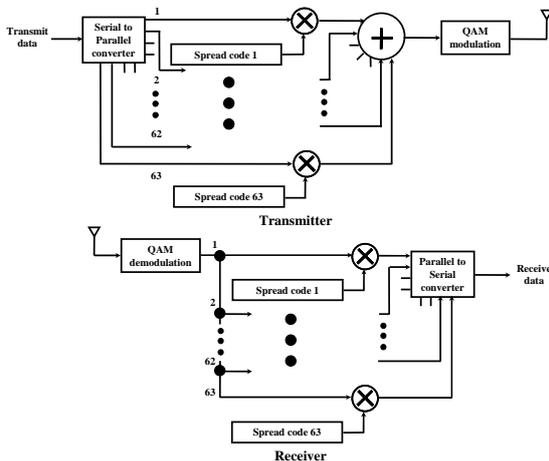


図 1 CDMA-QAM 方式のブロック図

ここで本方式において、64QAM の各シンボルに割り当てられているのは、送信データそのものではなく、拡散変調によって多元化された CDMA 信号である。したがって、仮に受信部での QAM 復調時にシンボルを誤ったとしても、CDMA の逆拡散処

理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。現在までに、図 1 の構成に基づいた計算機シミュレーションを実施し、その性能を評価している。

以上、これらの成果を踏まえて本研究では、CDMA-QAM 方式を採用したハードウェアを開発し、フィールド試験などによる性能評価を行い、次世代列車制御システムへの実用化の可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

前述の研究目的に基づいて、具体的な研究の方法として、下記の流れで実施する。

(1) CDMA-QAM 変復調器の開発

これまでの計算機シミュレーションによる成果を基に、CDMA-QAM 変復調器を開発する。ここで、復調部は、フィルタや同期捕捉など、変調部に比して多くの機能を有している必要があるため、QAM 部と CDMA 部とを独立して開発することが好ましい。このことを踏まえて図 2 のように、CDMA-QAM 変調部および QAM 復調部はオーディオ信号処理などで多くの実績がある DSP (Digital Signal Processor)、CDMA 復調部はプログラマブルで汎用的なデバイスである FPGA (Field Programmable Gate Array) によりそれぞれ開発する。

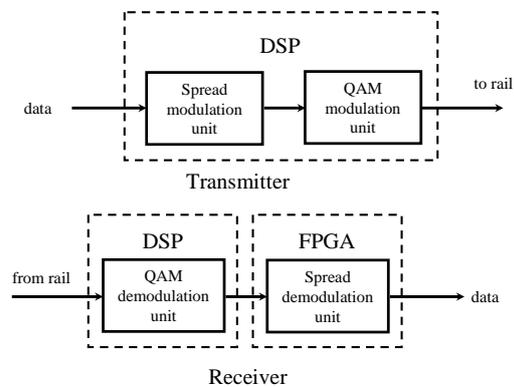


図 2 CDMA-QAM 方式のハードウェアアーキテクチャ

(2) CDMA-QAM 変復調器の基礎実験

開発したハードウェアの基礎実験を実施する。CDMA-QAM 変調部や QAM 復調部においては、キャリア同期や AGC (Automatic Gain Control : 自動利得制御) などの機能やリアルタイム処理性を、また、CDMA 復調部では拡散符号との相関処理特性や処理速度特性などを明らかにする。

(3) 実際のレールを用いたフィールド試験

実際のレールを用いたフィールド試験による

り、レールの減衰特性などを前提とした伝送においても、本方式が有用であることを明らかにする。

4. 研究成果

(1) CDMA-QAM 変復調器の開発

まず、DSP により CDMA-QAM 変調器および QAM 復調器の開発を行った。実際の開発では TI 社の C6713DSK を用いた。表 1 にその仕様を示す。前に示したレールの周波数特性を考慮し、キャリア周波数としてオーディオ周波数帯である数 kHz 程度を採用している。システムの同期捕捉に関しては、復調器で送信データのシンボルの変化点を一定時間監視することにより実現した。変復調器のボードのクロックずれに対する同期保持に関しては、同期捕捉後、復調器の搬送波と受信信号との位相計測を行った上で、常に搬送波の位相を変化させながら追従している。さらに、レールでの減衰などを考慮して AGC 機能も付加した。

表 1 QAM 変復調器の仕様

キャリア周波数	3000 Hz
CDMA の多元接続数	63
1 元あたりの情報速度	23.4375 bps
全体の情報速度	1476.5625 bps
サンプリング周波数	48 kHz

一方、FPGA による CDMA 復調部の実装においては、そのキーマシンである整合フィルタの開発を行った。整合フィルタのブロック図を図 3 に示す。

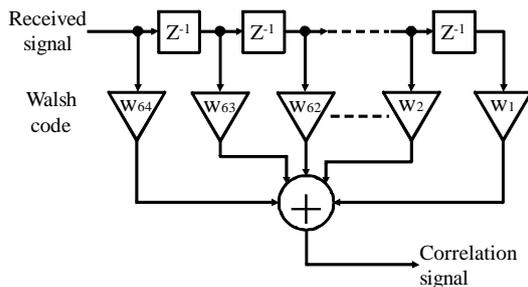


図 3 整合フィルタのブロック図

ここで、CDMA 復調器においては、CDMA で多重化された全てのチャンネルをワンチップで一括処理することが望ましい。今回、拡散符号として採用した符号長 64 の直交符号は、その符号数が 64 であるため、64 チャンネルをワンチップで処理できるような整合フィルタの最適化を図った。図 3 に示した整合フィルタでは、符号長と同じ 64 個の乗算器が含まれるため、これを 64 チ

ャンネルに拡張した場合、4,096 個必要となり、FPGA への実装は困難となる。このことを踏まえて、まず、乗算器を見直すこととした。ここで、図 3 のフィルタ係数である直交符号は +1 と -1 のみであり、これと受信信号との乗算は +1 の時は加算、-1 の時は減算を行うことと等価であるため、乗算器を加算器及び減算器で置き換えることが可能である。また、減算は一般的に 2 の補数との加算で実現可能であることが知られている。2 の補数は排他的論理和を用いることにより実現できるため、乗算器はビット数分の排他的論理和と加算器のみで構成でき、大幅な回路規模の削減を実現した。ただし、乗算器を加算器で置き換えたとしても、前述の通り、4,096 個の加算器を実装しなければならないので、効率的ではないので、時分割処理を用いた回路の最適化を図った。以上、開発したマルチチャンネル対応整合フィルタのブロック図を図 4 に示す。図 4 の構成で FIFO は、図 3 の遅延機に相当する素子であるが、この深さを 64 符号長×64 チャンネルの 4,096 とし、各チャンネルの直交符号を生成部でシリアル出力するような時分割処理で実現できる可能性があり、これによって、更なる回路規模の削減を図ることが可能である。

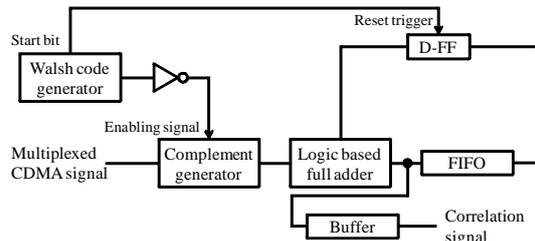


図 4 マルチチャンネル対応整合フィルタのブロック図

以上の構成に基づいて、実際に今回のターゲットデバイスである Altera 社の Cyclone II EP2C20FPGA が持つ 12,060 の LE 数に対して 2.8%程度の 342 となり、ワンチップによる 64 チャンネル処理が実装可能であることを明らかにした。

(2) CDMA-QAM 変復調器の基礎実験

開発した QAM 変復調器について、図 5 に示すように変復調ボードをオーディオケーブルで接続した基礎実験を行った。図 6 に QAM 変調後の出力信号、また、図 7 にコンスタレーション特性を示す。これらの図より、変復調器をオーディオケーブルで接続した基礎実験において、同期捕捉や同期保持などの基本機能がリアルタイムで処理され、結果として、良好なコンスタレーション特性が得られることを確認した。

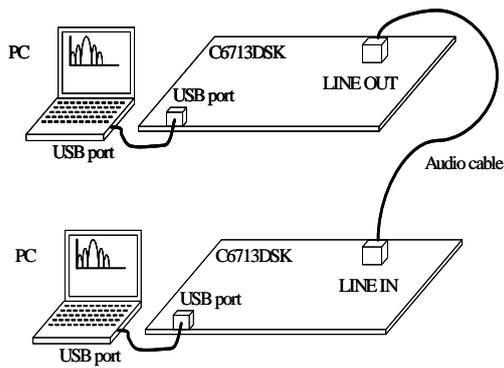


図 5 QAM 変復調器の基礎実験構成

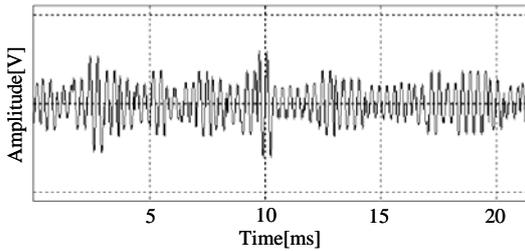


図 6 CDMA-QAM 変調信号

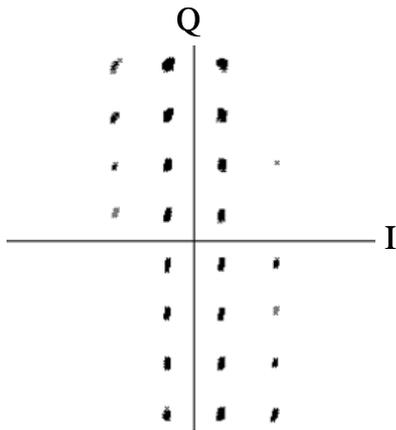
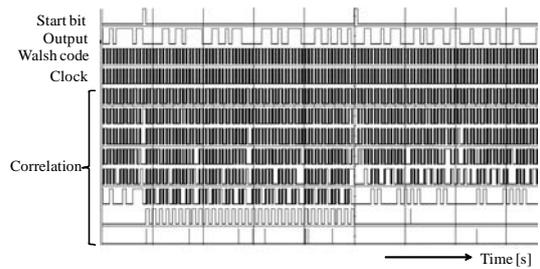
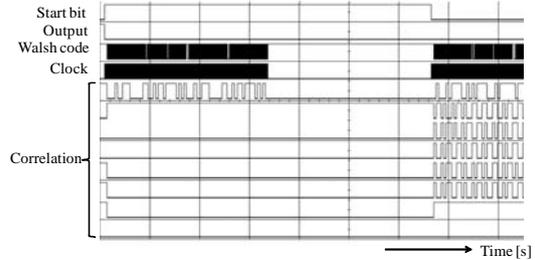


図 7 基礎実験で得られたコンスタレーション特性

CDMA 受信器については、M(Maximum length) 系列を送信データとし、それを CDMA 多重化した信号を入力し、その処理性能を評価した。その結果を、図 8 に示すが、これらの図より、符号同期確立を意味するスタートビットが H レベル時に、FIFO 出力は+64 か-64 のいずれかを取っており、前述の直交符号の相関特性を満足していることを確認した。また、出力データが入力として与えたデータ系列と一致していることも確認した。また、処理速度に関しては、EP2C20FPGA が持つ 50MHz のマスタクロックに対して、64 チャンネルの時分割処理を実行した場合、最大で処理できる伝送速度は 3,051bps となり、表 1 に示した CDMA-QAM 変調器の伝送速度を処理できることを明らかにした。



(a) 時間軸 : 10ms/div.



(b) 時間軸 : 0.1ms/div.

図 8 CDMA 復調器出力波形

(3) 実際のレールを用いたフィールド試験

C6713DSK を用いた QAM 変復調部の開発および基礎実験での成果を踏まえて、実際のレールを用いて、それが持つ狭帯域特性などに対する本装置の性能評価を行うために、フィールド試験を実施した。図 9 にフィールド試験の構成図を示す。図 9 より、送信側では C6713DSK によって生成された QAM 変調信号をアンプ及びトランスを介してレールへと伝送した。一方、受信側では列車上の受電器により受信した後、C6713DSK によって QAM 復調を行った。そして今回の試験において、図 10 のようなスペクトラム分布および図 11 のようなコンスタレーション特性を得た。これらの結果より、図 10 に示すようなレールの狭帯域特性に対しても、I 相では良好なコンスタレーション特性が得られることを図 11 より確認した。前述の通り、CDMA-QAM 方式では CDMA 信号の上位ビットを I 相に割り当てているため、この特性は CDMA 復調を経て良好な伝送を行う上で有利である。

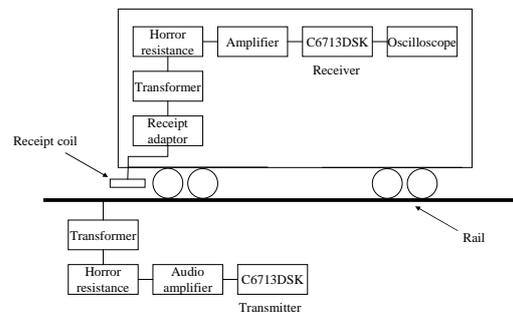
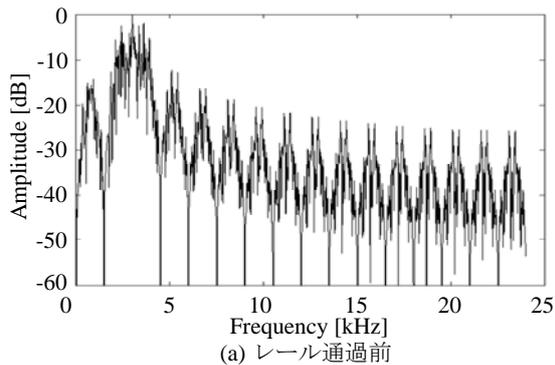
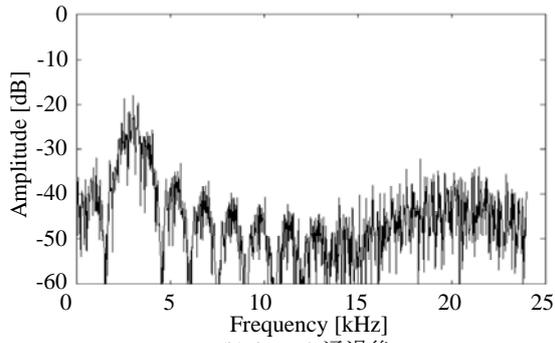


図 9 フィールド試験の構成図



(a) レール通過前



(b) レール通過後

図 10 フィールド試験でのスペクトラム分布

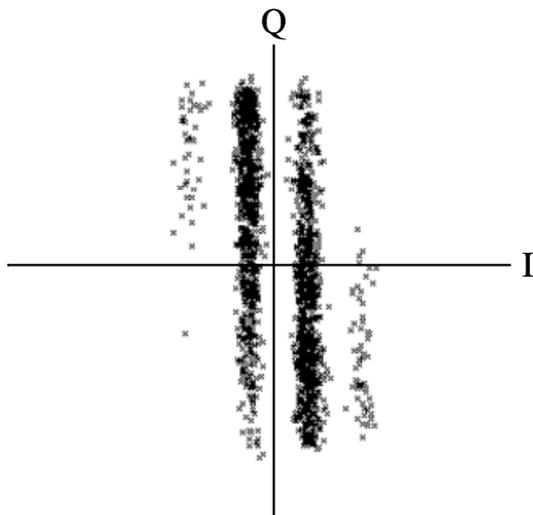


図 11 フィールド試験でのコンスタレーション特性

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 1 件)

- (1) H. Mochizuki, S. Takahashi, H. Nakamura, S. Nishida and R. Ishikawa: Development of a High-speed Rail Transmission System Using Digital Signal Processors for Railway Signalling, WIT Transactions on The Built Environment, 103 巻, 査読有, 2008, pp.295-304

〔学会発表〕(計 7 件)

- (1) 吉村元志: C6713DSK を用いた鉄道信号用 CDMA-QAM 伝送装置の評価, 第 10 回 DSPTS 教育者会議, 2008 年 9 月 11・12 日, 東京工業大学大岡山キャンパス
- (2) H. Mochizuki: Proposed CDMA-QAM Modulation Method and Application to High-Speed Rail Transmission Technology for Railway Signaling, The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, 2008 年 7 月 6~9 日, 下関
- (3) 吉村元志: FPGA を用いた鉄道信号システム用 CDMA 受信機的设计, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム, 2007 年 12 月 18~20 日, 東京
- (4) 史福明: 鉄道信号用 CDMA-QAM 式レール伝送システムの開発, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム, 2007 年 12 月 18~20 日, 東京
- (5) 吉村元志: FPGA による鉄道信号システム用 CDMA 受信機の開発, 2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2007 年 9 月 10~14 日, 鳥取大学
- (6) 史福明: フィールド試験による鉄道信号用 CDMA-QAM 伝送装置の評価, 2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2007 年 9 月 10~14 日, 鳥取大学
- (7) 望月寛: C6713DSK を用いた鉄道信号用 CDMA-QAM 伝送装置の開発, 第 9 回 DSPTS 教育者会議, 2008 年 8 月 30・31 日, 東京工業大学大岡山キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

望月 寛 (MOCHIZUKI HIROSHI)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号: 10434119