論文

狭帯域多重シングルキャリア伝送方式による 高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線

高橋 拓也¹, 久保 博嗣²

¹ 立命館大学院 理工学研究科, 〒525-8577 滋賀県 草津市 野路東 1-1-1

² 立命館大学 理工学部 電子情報工学科, 〒525-8577 滋賀県 草津市 野路東 1-1-1

Large-Cell Wireless Train Radio Communications Employing Narrow Band Multiple Single Carrier Modulation Schemes for High-Speed Railways

Takuya Takahashi¹ and Hiroshi Kubo²

¹Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577, Japan

²Department of Electronic and Computer Engineering, Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577, Japan

E-mail: ¹ri0051se@ed.ritsume.ac.jp, ²kubohiro@fc.ritsume.ac.jp

Abstract This paper proposes train radio communications for high-speed railways to achieve the following three items compared with the conventional systems: 1) higher frequency efficiency; 2) faster mobile speed; 3) larger cell radius. Comparing with Global System for Mobile Communications-Railway (GSM-R) and Terrestrial Trunked Radio (TETRA) in European train radio communications, although the conventional Japanese train radio communications have excellent frequency efficiency and communication quality, they have weakness on mobile speed and cell radius. This paper proposes train radio communications, which can achieve the same levels as GSM-R and TETRA for the items 2), and 3), maintaining the advantages of the conventional Japanese systems for the item 1). Finally, computer simulation results show the proposed systems can extend the cell radius of the base station comparable to GSM-R and TETRA at mobile speed of 300km/h while maintaining the same level of communication quality and frequency efficiency as the conventional Japanese train radio communications.

Keywords: train radio communication, high-speed railway, large cell, double selectivity, multiple single carrier

1. まえがき

近年、環境にやさしい交通手段として鉄道が世界的に注目されており、特に米国、ベトナム、インドなどの国をはじめとした多くの国で高速鉄道への期待が高まっている [1]。高速鉄道の安全走行に欠かせないものの一つとして列車無線システムが挙げられる。列車

無線システムとは、中央指令所と列車乗務員が列車の走行状態の確認や事故や災害の防止のために連絡を取る際に用いられる [2]。それゆえ、列車無線システムにおいて通信の高信頼性が重要視されている。さらに近年では、無線通信を活用した列車制御システムが普及していることから通信品質への要求は高まりをみせている。

現在、世界では列車無線システムとして Global System for Mobile Communications-Railway (GSM-R) や Terrestrial Trunked Radio (TETRA) などの欧州方式が広く用いられている [3], [4]。一方で、現在、日本国内で用いられている列車無線システムとしては、在来鉄道にて運用されている空間波方式 [5] と新幹線にて運用されている leaky coaxial cable (LCX) 方式 [6] に大別できる。LCX 方式では、高価な漏えい同軸を用いるため、空間波方式よりも多額のコストが必要となる。それゆえ、空間波を用いた列車無線システムへの要求は高い。しかし、現行の日本の空間波列車無線システムでは、高い周波数利用効率および高信頼性通信は実現されているものの、対応可能な移動速度および基地局セル半径の点で GSM-R や TETRA と比較して課題を有している。以上を踏まえると、次の4点の課題を克服した高速鉄道用の空間波列車無線システムへの需要は高いと考えられる。

- (a) 少ない周波数資源での通信システムの実現
- (b) 対応可能な移動速度の向上
- (c) 基地局間距離の拡大
- (d) 高い通信品質の実現

本論文でターゲットとする高速鉄道用の空間波列車無線システムは、現行の空間波方式の在来線列車無線システムを踏襲しつつ、列車の高速移動化を実現するものである。特に、海外高速鉄道のようにトンネル等が比較的少なく、音声通話が主流ではあるが、将来的には列車制御にも流用可能な無線通信システムを想定する。本無線通信システムの最大の利点は、LCX 方式と比較して比較的安価に無線通信システムが構成できることである。

本論文では、課題 (a) に対しては、同一ゾーン内の複数の基地局が同一周波数を用いて、同一情報を送信する同一周波数複局同時送信方式 [7] を採用する。課題 (b) に対しては、高速時変伝送路に対して高い追随性を有することで知られている伝送路予測形の *persurvivor processing maximum-likelihood sequence estimation* (PSP-MLSE) [8] を採用する。課題 (c) に対しては、狭帯域化したキャリアを並列伝送する多重シングルキャリア (*multiple single carrier*: MSC) 伝送方式 [9] を採用する。本論文では、これらの従来手法を組み合わせ、現行の在来線列車無線システムの大ゾーン化および高速移動化に対応することによって、上記記載のターゲットにおいて、上記 (a)~(d) の課題を解決することのできる高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線システムを提案する。本論文では、特に地上→列車方向の

下り回線に着目して議論を進める。最後に、計算機シミュレーションにより、提案システムを採用することによって、比較的良好な *signal-to-noise ratio* (SNR) を得ることのできる環境下においては、現行の日本の在来線列車無線システムと同等の通信品質および周波数利用効率を維持しつつ、列車が 300km/h で走行する際の基地局間距離を 46km、すなわち、セル半径を 23km 程度まで拡大可能であることを明らかにする。

本論文は次のように構成される。まず、2. では高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線の実現における課題とその解決策に関して論じる。3. では想定する差動符号化による通信方式の概要として具体的に伝送路予測形 PSP-MLSE に焦点を当てて論じる。4. では検討する多重シングルキャリア伝送方式の概要に関して論じる。そして、5. では提案システムである狭帯域多重シングルキャリア伝送方式を用いた伝送路予測形 PSP-MLSE が空間波列車無線の大ゾーン化・高速化に有効であることを明らかにする。6. では本論文の結果と今後の方向性についてまとめる。

2. 高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線の実現における課題と解決策

2.1 列車無線の課題

列車無線とは、鉄道沿線上の基地局と、列車に搭載されている車上局との間で行われる通信のことである。一般的に列車無線システムに要求される条件として次の2点が挙げられる。

- (i) 高速走行時および停止時ともに高信頼性通信の実現
- (ii) 少ない周波数資源でのシステムの実現

条件 (i) は、中央指令所と列車乗務員間の音声通話であることを考慮すると、列車の安全走行のために特に重要な課題となる。許容される伝送レートが比較的低い列車無線システムにおいては、セキュリティ対策も考慮して話者特定可能なレベルの音声通信を実現するためには、非常に良好な *bit error rate* (BER) が要求される。さらに近年では、無線通信を活用して *European Train Control System* (ETCS) [10] や *Advanced Train Administration and Communications System* (ATACS) [11] などの無線式列車制御システムが実現されることから、極めて良好な通信品質が要求されることが考えられる。条件 (ii) は、使用可能な周波数帯域幅が狭く、*point to*

multi-point (P-MP) 通信を前提とする列車無線においては避けられない課題である。

2.2 GSM-R, TETRA と日本の列車無線システム

現在、世界で広く用いられている列車無線用のデジタル通信方式として GSM-R や TETRA が挙げられる [3], [4]。GSM-R は第 2 世代携帯電話システムである GSM において鉄道用の周波数チャネルを設けて利用されているシステムである。また、現在、日本国内で運用されている列車無線システムとしては、在来鉄道にて運用されている空間波方式 [5] と新幹線にて運用されている LCX 方式 [6] が挙げられる。空間波方式は、GSM-R や TETRA と同様に基地局と、列車に搭載されている車上局との間で電波を用いて通信を行う方式である。一方、LCX 方式では、沿線上に敷設されている LCX と列車搭載アンテナとの数 m 間にて無線通信が行われている。そのため、LCX 方式では沿線上全てに LCX を敷設する必要があるため、空間波方式と比較して設備の導入コストおよびメンテナンスコストが高額となる。それゆえ、空間波を用いた高速鉄道用列車無線システム実現の要求は高い。表 1 に GSM-R および TETRA と日本の列車無線との比較を示す。表 1 か

表 1 欧州方式と日本方式

Table 1 Comparison of European systems and Japanese systems

	GSM-R	TETRA	空間波方式	LCX 方式
セル半径 (基地局間隔)	5-10km	10-25km	1.5km (3km)	(30km)
BER	10^{-2} 程度	10^{-2} 程度	10^{-4}	10^{-4}
周波数繰返し数	multiple	multiple	1	1
チャネル間隔	200kHz	25kHz	6.25kHz	6.25k-600kHz
変調方式	GMSK	$\pi/4$ QPSK	$\pi/4$ QPSK	$\pi/4$ QPSK
使用周波数帯域	900MHz 帯	400MHz 帯	400MHz 帯	400MHz 帯
伝送速度	270.833kbps	36kbps	9.6kbps	9.6k-384kbps
速度	300-500km/h		150km/h	300km/h

らわかるように現在、日本の空間波方式ではセル半径が 1.5km 程度となっている。一方、GSM-R や TETRA は地形にもよるが郊外では最大で半径 25km の広大なエリアをカバーすることが可能である。したがって GSM-R や TETRA の方が日本の空間波方式と比較して設置する基地局の数が少なく済むため、インフラ設備のコストは低い。加えて、GSM-R や TETRA はモデムのターゲット BER は 10^{-2} 程度であるものの、最高速度が 500km/h の環境下でも運用が可能となっている。一方で、日本の空間波方式は、GSM-R や TETRA と比較して 100 分の一以下の BER を達成しており、

高信頼な通信が実現されている。近年では、無線通信を活用して無線式列車制御システムが実現されつつあるため、表 1 のような 10^{-4} 以下のモデムのターゲット BER が要求される。また、日本の空間波方式では、ゾーン内の複数の基地局が同一の周波数帯を用いて、同一信号を送信する方式 (同一周波数複数局同時送信方式) [7] が採用されているため、GSM-R や TETRA と比較して周波数繰返し数が少なく、周波数利用効率が低い。以上より、GSM-R および TETRA と日本の空間波方式を比較すると、セル半径と対応可能な移動速度の点では GSM-R および TETRA が空間波方式よりも有効であり、通信品質および周波数利用効率の点では、空間波方式の方が GSM-R および TETRA よりも有効であることが明らかである。そこで、本論文では、現行の日本の空間波方式のシステムを踏襲しつつ、欧州方式 (GSM-R および TETRA) と同等以上の大ゾーン化および高速移動化に対応することが可能である高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線システムを提案する。以降、本論文にて検討する高速鉄道用空間波列車無線システムは現行の在来線列車無線システムを踏襲したシステムとして議論を進めることとする。表 2 に提案する列車無線システムの目標値を示す。しかし、表 2

表 2 提案システムの目標値

Table 2 Target value of proposed system

	提案システム
セル半径 (基地局間隔)	20-25 km (40-50 km)
BER	10^{-4}
周波数繰返し数	1
速度	300-500 km/h
キャリア周波数	400MHz
占有帯域幅	5.8kHz 以下
伝送速度	9.6kbps

に示す目標値を達成するためには、次の 3 点の課題に対応する必要がある。

- 高い周波数利用効率の実現
- 現行の在来線列車無線と比較して 2 倍以上の速度への対応
- GSM-R や TETRA と同等のセル半径の実現

2.3 同一周波数複数局同時送信方式

一般に、直線上のサービスエリアを有する P-MP 通信において、高い周波数利用効率の実現のためには、使用周波数帯の繰返し数を削減することが効果的である。ここで、使用周波数帯の繰返し数とは、セルラー

システムのセル繰返し数に対応するものである。そこで、列車無線のような P-MP 通信を想定したシステムにおいては、同一周波数複数局同時送信方式が有効である [7]。同一周波数複数局同時送信方式とは、同一ゾーン内の複数の基地局が同一の搬送波周波数 (f_c) を用いて、同一の情報を一斉送信する方式である。図 1 に同一周波数複数局同時送信方式のシステムモデルを示す。ここで、同一周波数複数局同時送信方式における各基地局の送信タイミングは同期されているものとする。現行の空間波方式の在来線列車無線システムでは GPS (global positioning system) 信号を用いて各基地局の送信タイミングの同期を行っている [12]。この時、GPS 信号を用いて、伝送距離に合わせて、最遠端基地局と同等の伝送遅延時間に合わせることで各基地局の送信タイミングの同期を行っている。そのため、基地局間距離およびセル半径を拡大する場合においても送信タイミングの同期を実現することは可能であると考えられる。図 1 のようなシステムでは、P-MP 通信を行う複数の基地局に対して 1 つの周波数帯域を割り当てるのみで済むため、周波数利用効率を高めることが可能である。しかし、移動局 (mobile station : MS) は最大で $4R_{cell}$ 以上の距離差に相当する遅延時間差に対応する必要がある。ここで、 R_{cell} は基地局のセル半径である。

図 1 同一周波数複数局同時送信のシステムモデル
Fig. 1 P-MP communication system model

2.4 高速鉄道用空間波列車無線における 2 重選択性フェージング

同一周波数複数局同時送信方式を想定した高速鉄道用空間波列車無線システムにおいては、次のような課題が存在する。

- (1) 列車の高速走行に伴う、高速なドップラー変動
- (2) セル半径 R_{cell} の拡大に比例して、隣接基地局から到来する信号の遅延時間広がりが増大

(1) は時間選択性フェージング、(2) は周波数選択性フェージングと関係し、これら二つのフェージングが同時に発生することを 2 重選択性フェージングと呼ぶ。無線伝搬環境の厳しさを規定するパラメータとして、シンボル周期正規化最大遅延時間広がり τ_D/T 及び、シンボルレート正規化最大ドップラー周波数 $f_D T$ がある。ここで、 T はシンボル周期を示す。 τ_D/T は周波数選択性フェージング、 $f_D T$ は時間選択性フェージングと関係し、これらは、サブキャリアの占有帯域幅 ($1/T$) をパラメータとして、トレードオフの関係を有する。また、 $f_D T$ は以下の式にて算出することができる。

$$f_D T = \frac{v f_c}{c f_s} \quad (1)$$

ここで、 v は移動速度、 f_c は搬送波周波数、 f_s はサブキャリアのシンボルレート、 c は光速、 f_D はドップラー周波数である。表 3 に想定する高速鉄道用列車無線に

表 3 高速鉄道列車無線における $f_D T$
Table 3 Parameters in high-speed railways

	SC	MC	
N_{SC}	1	2	4
$f_s (= 1/T)$	4.8ksps	2.4ksps	1.2ksps
f_c	400MHz		
v	300km/h = 83.3m/s		
c	3.0×10^8 m/s		
f_D	111Hz		
$f_D T$	2.3%	4.6%	9.3%

における具体的な数値を代入した際の $f_D T$ を示す。ここで、 N_{SC} はサブキャリア数である。ただし、マルチキャリア (multi-carrier : MC) 伝送方式は N_{SC} 個のサブキャリアを並列伝送することで、4.8ksps を実現するものとする。ここで、4.8ksps とは現行の日本の在来線列車無線システムのシンボルレートの値である。表 3 より、MC 伝送方式において、 $f_D T$ は N_{SC} を 4 とした場合には 10% 程度となる。それゆえ、システムの占有帯域幅を一定とすると MC 伝送方式はシングルキャリア (single carrier : SC) 伝送方式と比較して N_{SC} 倍以上の $f_D T$ に対応する必要がある。

本論文では、時間選択性フェージングに対応するために予測形の PSP-MLSE を検討する。予測形の PSP-MLSE については文献 [8] に従う。また、周波数選択性フェージングに対応するためには、シンボル周期を長くしたキャリアを並列伝送する MC 伝送方式を検討する。

3. 差動符号化による通信方式

3.1 想定する通信システムのモデル

図2 通信システムのモデル

Fig. 2 Communication system model

本論文では、空間波方式の列車無線システムにおける地上→列車方向の通信に着目して議論を進める。また、受信アンテナ q ($q = 1, 2, \dots, N_R$) に対応する離散時間 k の任意な信号 a を $a_k[q]$ と記載する。図2に、 N_R 本の受信アンテナを有する single-input multiple-output (SIMO) 伝送系による通信システムのモデルを示す。図2において、SIMO 伝送路内における伝送路インパルス応答 (channel impulse response : CIR) は $h_k[q]$ とする。差動符号化変調器は m ビットの送信情報 b_k ($b_k \in \{0, 1, \dots, 2^{m-1}\}$) を満たす) を入力し、差動符号化変調信号 x_k を作成する。この差動符号化変調信号 x_k は以下の式にて算出することができる。

$$u_k = \exp\left(j\frac{2\pi}{M}b_k\right) \quad (2)$$

$$x_k = u_k x_{k-1} \quad (3)$$

ここで、 u_k は変調情報信号、 M は 2^m である変調多値数を示し、 $x_0 = 1$ とする。差動符号化変調信号 x_k は、SIMO 伝送路を介して伝送路インパルス応答 $h_k[q]$ の影響を受けた後、加法性白色ガウス雑音 (additive white Gaussian noise : AWGN) $w_k[q]$ を受けて、次のような N_R 系統の受信信号 $r_k[q]$ となる。

$$r_k[q] = h_k[q]x_k + w_k[q] \quad (4)$$

復調器は、この受信信号 $r_k[q]$ を入力し、送信情報の推定値である $\hat{b}_k$ を出力する。

3.2 高速時変伝送路のための予測形 PSP-MLSE

高速鉄道列車無線のような $f_D T$ が数%以上となる伝搬環境では、伝送路推定とデータ判定を同時に実現可能

である joint detection (JD) が有効となる。JD の典型的な例として、差動符号化を用いた遅延検波 (differential detection : DD) が挙げられる [13]。また、差動符号化を一般化したものが差動時空符号化 (differential space-time coding : DSTC) であり、DSTC を採用した際の復調方式の一つとして、PSP-MLSE が検討されている。

本節では、文献 [8] を簡単にレビューする。PSP-MLSE は、Viterbi algorithm (VA) に基づき、データ判定を行う復調方式である。VA の枝メトリック Γ_k 、及びパスメトリック H は、それぞれ次のように表現できる。

$$\Gamma_k = \sum_{q=1}^{N_R} |r_k[q] - \tilde{r}_k[q]|^2 \quad (5)$$

$$H = \sum_k \Gamma_k \quad (6)$$

ここで、PSP-MLSE は、全ての情報系列の候補 $\tilde{b}_k$ に対応する変調系列候補 $\tilde{u}_k$ に対してパスメトリック H を算出し、最小のパスメトリックに対する $\tilde{u}_k$ から送信情報の推定系列 $\hat{b}_k$ を求め、出力する。

本論文では、復調側の回路規模を小規模にするために、 Γ_k を次のようなマンハッタンメトリックとする。

$$\Gamma_k = \sum_{q=1}^{N_R} (|\operatorname{Re}[e_k[q]]| + |\operatorname{Im}[e_k[q]]|) \quad (7)$$

$$e_k[q] = r_k[q] - \tilde{r}_k[q] \quad (8)$$

ここで、受信信号のレプリカ値 $\tilde{r}_k[q]$ は、推定 CIR $\tilde{h}_k[q]$ を用いて次のように表現できる。

$$\tilde{r}_k[q] = \tilde{h}_k[q]\tilde{x}_k \quad (9)$$

$$\tilde{h}_k[q] = \sum_{n=1}^N v_n \tilde{G}_{k-n}[q] \quad (10)$$

$$\tilde{G}_k[q] = r_k[q]\tilde{x}_k^* \quad (11)$$

ここで、 N は観測シンボル数、 $\tilde{G}_k[q]$ は、逆変調信号、 v_n は各逆変調信号に対する重み付け係数を示す。PSP-MLSE では、適用環境に応じて v_n を変化させることによって、受信感度と追従性とのトレードオフを制御可能である。また、高速時変伝送路下における追従特性を維持しつつ、受信感度特性を改善する手法として、文献 [14] にて次のような係数 v_n の設定が提案されている。

$$v_n = \begin{cases} \frac{N}{N-1} & (n=1) \\ -\frac{N}{N-1} & (n=N) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

4. 検討する多重シングルキャリア伝送方式

MC 伝送方式として主流技術である orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) [15], [16] の他, MSC 伝送方式 [9] がある。以下に, OFDM と MSC 伝送方式の周波数利用効率に関して論じる。OFDM はキャリア間の直交関係を利用して, キャリア間の周波数間隔を最小に抑えることができる。そのため, 周波数軸上では高い周波数利用効率を実現できる。しかし, OFDM は, 時間軸上にガードインターバル (guard interval : GI) を必要とするため, 時間軸上での周波数利用効率は低下する。他方 MSC 伝送方式は, 時間軸上に GI を必要としない。そのため, 時間軸上での周波数利用効率は低下しない。しかし, MSC 伝送方式は, 周波数軸上ではキャリア間にガードバンドを必要とするため, 周波数軸上での周波数利用効率は低下する。以上より, 周波数軸と時間軸を総合的に考えると, OFDM と MSC 伝送方式の周波数利用効率には大差はないと考えられる。

次に, OFDM と MSC 伝送方式の特徴について論じる。OFDM は, 時間軸上に GI を設けることにより, 符号間干渉 (intersymbol interference : ISI) に対して強い耐性を得ることができる。しかし, OFDM は, キャリア間の周波数間隔が狭いため, キャリア間干渉 (intercarrier interference : ICI) に弱い面を持つ。対して, MSC 伝送方式は, サブキャリア間にガードバンドを設けることにより, ICI に対して強い耐性を得ることができる。また, MSC 伝送方式はサブキャリアの占有帯域幅を狭めることにより, 伝送効率は減少するものの, ISI の影響を抑圧することが可能である。この際, サブキャリア数を調整することにより, 伝送効率を維持することができる。以上より, 高速鉄道用列車無線のように高速な移動に伴う周波数変動が大きい環境下では, ICI への耐性が高い MSC 伝送方式が有効である。そこで, 本論文では現行の日本の在来線列車無線にて規定されている占有帯域幅 (5.8kHz 以下) [12] 内に複数のサブキャリアを並べて伝送する MSC 伝送方式にて検討を行う。MSC 伝送方式の概要を図 3 に示す。ここで, α はロールオフ率, δ は隣接するサブキャリア間の周波数間隔に関するパラメータである。本論文では, 表 3 にも示すように, MSC 伝送方式の N_{SC} を 1, 2, 4 とした場合に関して検討する。

図 3 MSC 伝送方式の概要

Fig. 3 Overview of MSC modulation scheme

5. 計算機シミュレーション結果

5.1 シミュレーション条件

本論文では, 計算機シミュレーションにて提案方式である狭帯域の MSC 伝送方式を用いた伝送路予測形の PSP-MLSE の有効性を明らかにする。また, 参考のために比較方式として遅延検波も記載する。表 4 に計算機シミュレーションのパラメータを示す。変調方式は全て差動符号化を用いた $\pi/4$ シフト quadrature phase shift keying (QPSK) とする。伝送路はパス毎に独立なレイリーフェージングとし, $f_D T_0 = 2.3\%$ という非常に高速な場合に関して検討する。ここで, T_0 は SC 伝送時のシンボル周期を表す。なお, $f_D T_0 = 2.3\%$ は, 表 3 において, 列車の走行速度を 300km/h, $f_c = 400\text{MHz}$ とした際の SC 伝送時のシンボルレート $f_s = 4.8\text{ksps}$ にて正規化を行ったシンボルレート正規化最大ドップラー周波数の値である。表 3 をもとに, 本論文では, $f_D T_0 = 2.3\%$ は, $N_{SC} = 1$ (SC) の時は, $f_D T = 2.3\%$, $N_{SC} = 2$ (2SC) の時は, $f_D T = 4.6\%$, $N_{SC} = 4$ (4SC) の時は, $f_D T = 9.3\%$ に対応しているパラメータとして規定する。ここで, T は MSC 伝送方式時の各サブキャリアのシンボル周期を示す。また, 変調信号スペクトルは $\alpha = 0.2$ の送受均等分割のロールオフ特性, δ は 1.2 とする。ここで, 表 3 に記載の通り, SC, 2SC, 4SC 伝送方式における $f_s (= 1/T)$ はそれぞれ 4.8ksps, 2.4ksps, 1.2ksps であるため, $\alpha = 0.2$ かつ $\delta = 1.2$ より, 本論文における SC, 2SC, 4SC 伝送方式の占有帯域幅は全て 5.76kHz となり, 現行の日本の在来線列車無線にて規定されている占有帯域幅 (5.8kHz 以下) を満たすものとする。

文献 [17] にて記載されている通り, 現行の日本の在来線列車無線システムでは基地局間距離が約 3km, 1 つのゾーンが約 20 から 30km にて構成されていることから 1 つのゾーンを形成する基地局の数は 6 から 10

表4 計算機シミュレーションパラメータ

Table 4 Computer simulation parameters

比較方式	伝送路予測形 PSP-MLSE DD
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK
ロールオフ率 α	0.2
送信アンテナ数 N_T	1
受信アンテナ数 N_R	2 または 4
予測次数 L	1
伝送路予測における受信信号の 観測シンボル数 N	3

程度であるといえる。そこで、本論文では、基地局間距離およびセル半径の拡大を実現することを考慮し、計算機シミュレーション環境を図1において基地局の数を6とした同一周波数複局同時送信環境とする。この際、列車と基地局との距離は $R_{cell}, 3R_{cell}, \dots, 11R_{cell}$ となり、受信側の列車は直近の基地局からの信号に対して最大で $10R_{cell}$ の距離差に対応する遅延時間差のある遅延波までも受信することになる。ここで、信号の距離減衰は2.5乗則に基づくものとし、隣り合う基地局の距離差 $2R_{cell}$ に対応する遅延時間差を $\Delta\tau$ とする。

5.2 BER 特性

空間波を用いた従来の日本のアナログ列車無線システムではSNRが全線の99%以上で30dB以上を満たすように設計されている[12]。また、現行の日本の在来線列車無線システムは先述したアナログ列車無線システムの機器構成を踏襲していることから、現行の在来線列車無線システムにおいてもSNRが全線の99%以上で30dB以上を満たすように設計されていると考えられる。以上より、本論文では、現行の空間波方式と同等程度のSNRを満足することのできる環境下にて計算機シミュレーション評価を行うものとする。図4に平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 2$ とした場合の耐遅延波特性、図5に平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 4$ とした場合の耐遅延波特性を示す。また、図6に $f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 4$, $\Delta\tau/T_0 = 3/4$ とした場合の受信感度特性を示す。また、本論文では、 E_b を直近の基地局からの信号電力とする。

図4と図5より、受信アンテナ数 N_R を2倍にすることによって、提案システムである4SC伝送方式を用いたPSP-MLSEはダイバーシチ利得が大きく得られていることが明らかである。また、図5と図6より、送信機の電力を大きくすることによって、提案システム

図4 平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 2$ 時の耐遅延波特性

Fig. 4 BER performance as a function of $\Delta\tau/T_0$ at average E_b/N_0 of 25dB ($f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 2$)

である4SC伝送方式を用いたPSP-MLSEは基地局間の遅延時間差 $\Delta\tau$ が $3T_0/4$ 以下であれば、 $\text{BER} = 10^{-4}$ 以下を実現可能であることが明らかである。加えて、想定する f_s が4.8kspsのため、 $\Delta\tau = 3T_0/4$ より、隣接する基地局間距離 d を算出すると、 d は、約46km ($R_{cell} \approx 23\text{km}$) と求まる。文献[3]より、GSM-Rのセル半径は5-10km、TETRAのセル半径は10-25kmであるので、提案システムの採用により、これらの2つのシステムと同等のセル半径を実現しつつ、 $\text{BER} = 10^{-4}$ という高信頼通信の実現が可能であることが明らかとなる。図4から図6より、以下のことが明らかである。

- ① $\Delta\tau/T_0$ が小さい領域では、PSP-MLSE, DDともにSC, 2SC, 4SCの順で性能が劣化する
- ② PSP-MLSE, DDともにSC, 2SC, 4SCの順で $\Delta\tau/T_0$ に関する性能変動が減少する
- ③ DDに対するPSP-MLSEの性能改善量は、SC, 2SC, 4SCの順で大きくなる(SCの場合、PSP-MLSEよりDDの方が性能が良好な場合もある)

上記①の理由は、遅延時間が比較的小さい環境では、SC, 2SC, 4SCの順で増加する $f_D T$ が性能に大きく影響するためである。上記②の理由は、MSC伝送方式における N_{SC} 数を増大させることで、サブキャリアの狭帯域化を図ることができるからである。この狭帯域化により、耐遅延波特性が向上する。上記③の理由は、

図5 平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 4$ 時の耐遅延波特性

Fig. 5 BER performance as a function of $\Delta\tau/T_0$ at average E_b/N_0 of 25dB ($f_D T_0 = 2.3\%$, $N_R = 4$)

SC, 2SC, 4SC の順で $f_D T$ が増加し, 追従性の点で PSP-MLSE の方が DD よりも有効なためである ($f_D T$ に対する追従特性に関しては付録に記載の図 A.1 および図 A.2 を参照)。また, SC の場合, PSP-MLSE より DD の方が性能が良好な場合もあるのは, PSP-MLSE は伝送路予測によって DD よりも揺らぎによる性能劣化が大きいためである。

6. むすび

本論文では, 高速鉄道向けの大ゾーン空間波列車無線の実現における課題の解決策を提案した。具体的には, 同一周波数複数局同時送信, 差動符号化を用いた伝送路予測形 PSP-MLSE 及び狭帯域化 MSC 伝送方式を併用した通信システムの提案である。最後に, 計算機シミュレーション結果から, 提案システムである 4SC 伝送方式を用いた PSP-MLSE の採用により, 比較的良好な SNR を得ることのできる環境下において, 現行の日本の在来線列車無線システムと同等の通信品質および周波数利用効率を維持しつつ, 基地局間距離をおおよそ 46km, すなわち, セル半径を 23km 程度まで拡大可能であることを明らかにした。

本論文では, 空間波を用いた高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線の実現に向けて, 基礎的な側面から通

図6 $f_D T_0 = 2.3\%$, $\Delta\tau/T_0 = 3/4$, $N_R = 4$ 時の受信感度特性

Fig. 6 BER performance as a function of average E_b/N_0 ($f_D T_0 = 2.3\%$, $\Delta\tau/T_0 = 3/4$, $N_R = 4$)

信システムの検討を実施したが, 次の課題が残留している。

- ゾーン境界にて発生しうるビート干渉 [18] に対する性能評価が行えていないこと
- 誤り訂正を含めた性能評価が行えていないこと
- ライスフェージングに対する性能評価が行えていないこと

上記に関しては, 著者らの今後の課題として継続して検討する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19K04382 の助成を受けたものである。本研究に関して助言を頂いた三菱電機株式会社川本真紀夫氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 江口秀二: 我が国鉄道システムの海外展開の現状, コンクリート工学, Vol. 49, No. 9, pp. 15-21, Sep. 2011.
- [2] 川本真紀夫: 鉄道向け無線システムの概要, 通信ソサイエティマガジン, Vol. 11, No. 2, pp. 112-117, Sep. 2017.
- [3] Sepura: A comparison of TETRA and GSM-R for railway communications.
<http://fplreflib.findlay.co.uk/images/pdf/tetratoday/A-comparison-of-TETRA.pdf>.

- [4] Report ITU-R M.2418-0: Description of railway radiocommunication systems between train and trackside (RSTT), Nov. 2017.
- [5] ARIB STD-T61: Narrow band digital telecommunication system (SCPC/FDMA), 2005.
- [6] Report ITU-R M.2442-0: Current and future usage of railway radiocommunication systems between train and trackside, Nov. 2018.
- [7] 吉田勝弘, 西村佳久, 安部哲也, 大島良夫, 久保博嗣, 浦口剛, 岡崎彰浩, 棚田一夫, 岩瀬厚志, 山崎茂, 田子憲三, 谷口順: 鉄道環境におけるデジタル列車無線の試験評価(1) 一周波数繰返しとビート干渉の影響, 信学技報, Vol. RCS2001-62, pp. 1-6, July 2001.
- [8] H. Kubo, A. Okazaki, K. Tanada, P. Bertrand and K. Murakami: A multiple-symbol differential detection based on channel prediction for fast time-varying fading, IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No. 8, pp. 3393-3400, Aug. 2005.
- [9] 宮崎律子, 久保博嗣: 高速フェージングのためのマルチキャリア高次予測判定帰還遅延検波, 信学技報, Vol. RCS2014-35, pp. 19-24, June 2014.
- [10] <http://etcs.uic.asso.fr/specifications.html>.
- [11] Y. Kon: The new train control system ATACS by using ADS technologies, Proc. IEEE, The 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System, pp. 206-210, Nov. 2002.
- [12] 藤原功三: 鉄道と無線システム, RF ワールド, No. 38, CQ 出版, 2017.
- [13] J.G. Proakis and M. Salehi: Digital communications, Fifth edition, New York, McGraw-Hill, 2008.
- [14] N. Yumoto, T. Mori, T. Yamagishi, K. Shimomura and H. Kubo: Generalization of channel estimation weights for multiple differential detection based on per-survivor processing, Communications Express, Vol. 7, No.12, pp.432-437, Sep. 2018.
- [15] R. Chang and R. Gibby: A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme, IEEE Trans. Commun., Vol. 16, No. 4, pp. 529-540, Aug. 1968.
- [16] S. Weinstein and P. Ebert: Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform, IEEE Trans. Commun., Vol. 19, No. 5, pp. 628-634, Oct. 1971.
- [17] Report ITU-R M.2395-0: Introduction to railway communication systems, Nov. 2016.
- [18] H. Kubo and M. Miyake: Beat interference suppression techniques by means of transmission time diversity and adaptive equalization, Proc. IEEE, VTC2000-Spring, Vol. 3, pp. 1874-1877, May 2000.
- [19] H. Kubo, K. Murakami and T. Fujino: An adaptive maximum-likelihood sequence estimator for fast time-varying intersymbol interference channels, IEEE Trans. Commun., Vol. 42, Nos. 2/3/4, pp. 1872-1880, Feb./March/April 1994.
- [20] N. Seshadri: Joint data and channel estimation using blind trellis search techniques, IEEE Trans. Commun., Vol. 42, Nos. 2/3/4, pp. 1000-1011, Feb./March/April 1994.
- [21] R. Raheli, A. Polydoros and C.-K. Tzou: Per-survivor processing: A general approach to adaptive MLSE in uncertain environments, IEEE Trans. Commun., Vol. 43, Nos. 2/3/4, pp. 354-364, Feb./March/April 1995.
- [22] G.D. Forney, Jr.: Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference, IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. IT-18, No.3, pp.363-378, May 1972.
- [23] G. Ungerboeck: Adaptive maximum-likelihood receiver for carrier-modulated data-transmission systems, IEEE Trans. Com-

mun., Vol. COM-22, No.5, pp.624-636, May 1974.

[24] ETSI/GSM: GSM recommendations, 1991.

[25] 3GPP, TS 05.10, V 8.12.0: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) radio subsystem synchronization, Aug. 2003.

付録 MSC 伝送方式における N_{SC} 設定の詳細

図 A.1 平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $N_R = 2$ 時の追従特性

Fig. A.1 Tracking performance at average E_b/N_0 of 25dB in the absence of ISI ($N_R = 2$)

本論文にて狭帯域 MSC 伝送方式の N_{SC} の設定を 1, 2, 4 として検討を行った理由に関して詳細に説明する。ここで, $f_d T$ に対する追従特性を評価するために ISI のない環境にて評価する。図 A.1 に平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $N_R = 2$ とした場合の追従特性, 図 A.2 に平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $N_R = 4$ とした場合の追従特性を示す。図 A.1 と図 A.2 より, 検討方式である PSP-MLSE は, ISI が無い条件下においても $f_d T$ が 12% 以下でないと $\text{BER} = 10^{-4}$ 以下を達成できない。上記より, 高速鉄道用大ゾーン空間波列車無線システムを現行の在来線列車無線システムと同じ占有帯域幅にて実現することを考えると, 表 3 からわかるように MSC 伝送方式の N_{SC} を 4 以下に設定することが妥当である。

図 A.2 平均 $E_b/N_0 = 25\text{dB}$, $N_R = 4$ 時の追従特性

Fig. A.2 Tracking performance at average E_b/N_0 of 25dB in the absence of ISI ($N_R = 4$)

高橋 拓也 2018 年立命館大学理工学部電子情報工学科卒業。現在、立命館大学大学院理工研究科電子システム専攻在学中。デジタル無線通信方式の研究に従事。

久保 博嗣 1984 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1986 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機 (株) 入社。同社情報技術総合研究所無線通信技術部長を経て、2012 年から立命館大学理工学部電子情報工学科教授。デジタル無線通信方式の研究開発に従事。平成 6 年度電子情報通信学会学術奨励賞、平成 21 年度第 20 回電波功績賞電波産業会長賞、平成 22 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞受賞。工博。電子情報通信学会シニア会員、IEEE 会員、RISP 会員。

(2019 年 8 月 7 日受付 ; 2019 年 12 月 25 日再受付)