

# 地方交通線向け列車制御システムへの 汎用通信技術の適用

岩本 功貴\*      山口 大介\*      竹内 恵一\*  
岩澤 永照\*      岩城 詞也\*\*      中村 一城\*

Application of General-purpose Communication Technologies to Train Control System in Secondary Lines

Koki IWAMOTO      Daisuke YAMAGUCHI      Keiichi TAKEUCHI  
Nagateru IWASAWA      Nariya IWAKI      Kazuki NAKAMURA

Electronic blocking system that is a train control system used in secondary lines with single track and one blocking between two stations has been deteriorated, so that it is urgent to update the system. To reduce the cost for updating, a train control system that aims to exhibit the same functions as the conventional system and to perform communications between the ground and the car only in a limited area around the station has been suggested. In order to apply general-purpose communication technologies to the suggested system, the authors examined various items such as required specifications, communication method and network configuration. This paper describes the results of these examinations and the future issues.

キーワード：移動体通信，電波伝搬，地方交通線，列車制御システム，汎用通信技術，802.11a，SHDSL

## 1. はじめに

### 1.1 背景

近年，地方交通線などの，単線で駅間1閉そくの区間における列車制御システムとして導入されている特殊自動閉そく方式のうち，電子符号照査式（電子閉そく）<sup>1)</sup>は，システムの老朽化が進んでおり，その更新が検討されている。現行の電子閉そくでは，駅での列車の到着情報および出発要求に関する情報を車上から地上への無線通信により伝送しており，システムの更新に際しては，低コストでかつ現行のシステムと同様に無線を利用したシステムが望まれている。そこで，地上信号機の機能を車上に移行することで地上設備を削減し，駅周辺の限定したエリアでのみ地上-車上間の通信を行うことで現行のシステムと同等の機能を満足させることを目指した新たな列車制御システムが提案されている<sup>2) 3) 4)</sup>。本稿では，提案されている地方交通線向け列車制御システムにおける通信ネットワークを，汎用通信技術を用いた通信機器により構築するため，通信ネットワークに求められる要求仕様と，仕様に基づく通信手段および伝送方式の検討結果について述べ，通信ネットワーク構成の提案と検証試験の結果について報告する。さらに，汎用通信技術の列車制御用通信ネットワークへの適用に向けた今後の課題について示す。

\* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

\*\* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室  
(現 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社)

### 1.2 汎用通信技術

近年，Wi-Fiをはじめとする汎用通信技術が普及し，鉄道においても使用されている。本稿で述べる「汎用通信技術」とは，鉄道での利用に特化した専用通信方式以外の無線および有線通信方式のことを指す。本検討では，自営で通信回線を構築することを前提に，地方交通線向け列車制御システムへの適用が可能で，運用しやすい通信方式を提案する。

## 2. 列車制御システム用通信ネットワークの概要

提案する列車制御システムにおける，基本的な通信ネットワークの構成を図1に示す。ネットワークは主に中央装置，中央管理装置，駅制御端末，および車上装置を相互に接続するために構成する。中央装置および中央管理装置は各駅の制御端末を統括する役割があり，有線通信により各駅の制御端末と接続している。駅制御端末は，駅構内の制御情報に基づき，転てつ機等の制御を行うとともに，中央管理装置と車上装置の情報伝送を中継する役割があり，駅制御端末に接続された無線機を介して車上装置と接続する。よって，中央管理装置-車上装置間の通信は，列車が無線通信エリア内にいる間に限定される。また，基本機能を満足するために必要な無線通信エリアは，駅に到着したことを車上側が認識するための地上子から，列車の停止位置目標を含み，進出側分岐の車両接触限界までである。なお，無線機は各駅の進行

特集：信号通信技術

方向に1台ずつ設置することを基本とし、必要に応じて複数設置する。

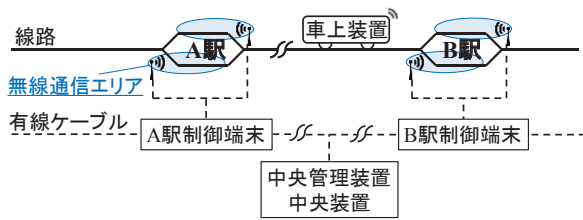


図1 システムのネットワーク基本構成

2.1 駅間通信

中央管理装置と各駅の駅制御端末間の通信は、既存のメタルケーブルを利用した高速データ通信が可能なSHDSL (Single-pair High-speed Digital Subscriber Line) 方式のモデムを用いることとした。SHDSL モデムの伝送速度は、制御情報の電文長、無線通信における通信可能エリアの広さ、駅間距離に加え、音声通話機能を付加することを想定した速度で設定する。

2.2 地上-車上間通信

無線通信区間では、免許が不要でなおかつ前述した音声通話機能を考慮した伝送速度を満足できる汎用無線通信方式として無線LANを使用することとした。さらに無線LANの中でも登録台数が少ないことから比較的干渉を受けにくいと考えられ、これまで対列車通信用途での使用実績のない5GHz帯無線LAN (IEEE 802.11a)<sup>5)</sup>を選定した。地上側のアンテナは、列車と対面する方向に指向性を有し、車上側のアンテナは、列車の進行方向に指向性を有するものを使用することとした。なお、駅制御端末と地上無線機の接続は、その距離に応じてLANケーブルまたは光ケーブルを用いることとした。

さらに、特定の機種やメーカーに依存した機能の使用は極力避け、できるだけ規格に準拠した機能のみでシステムを構築することとした。

2.3 通信機器の設置方法

各駅の地上に設置する通信機器の構成例を図2に示す。SHDSL モデム、ネットワークスイッチおよび駅制御端末は駅の機器室内への設置を想定している。隣駅からの情報は、メタルケーブルを介してSHDSL モデムのLAN インターフェイスから駅制御端末および各無線機に接続しているネットワークスイッチに至る構成とした。無線機および無線機に接続している地上アンテナは、無線通信エリアを考慮して決められた電化柱等に固定する。さらに、安定性を向上させるため、垂直偏波および水平偏波の両偏波を用いる偏波ダイバーシチを採用することとした。

車上の通信機器の構成例を図3に示す。車上の通信機器は、アンテナ、無線機、ネットワークスイッチ、測定用PCおよび車上装置で構成されている。アンテナで受信した地上からの情報は、無線機およびネットワークスイッチを通じ、車上装置に伝送される。

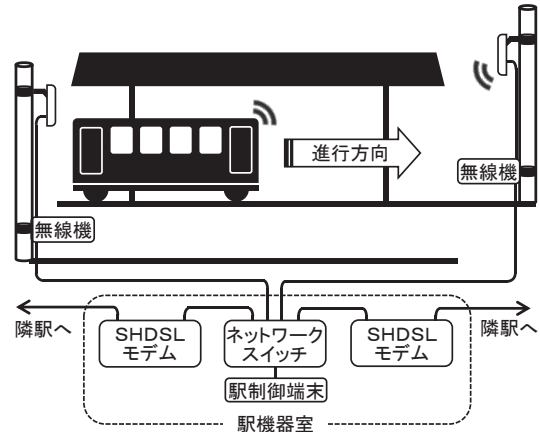


図2 各駅の通信機器の構成

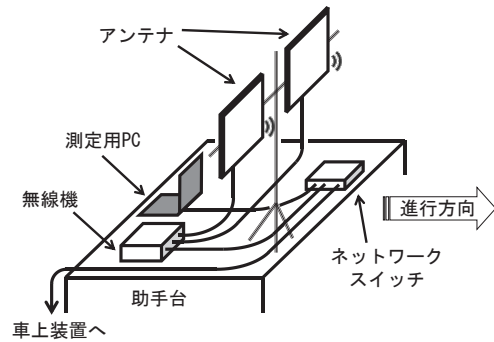


図3 車上に仮設した通信機器の構成

3. 機能検証試験

前章で示したネットワーク構成に基づき、機能を確認するための試験を実施した。本章では、試験の概要とその結果について記す。

3.1 試験区間

試験は、図4に示すC駅、D駅、E駅およびF駅で構成された線区で実施した。駅間は単線でF駅(終端駅)を除く各駅は列車の入れ違いが可能である。試験は、駅間の有線通信および地上-車上間の無線通信に分けて実施した。



図4 試験で使用する線区の駅構成

### 3.1.1 駅間通信

駅間は、2.1節で述べたように、駅間のメタルケーブルに接続する SHDSL モデム、ネットワークスイッチおよび駅制御端末で構成される。各機器を駅の信号機器室に仮設して、各駅の制御端末間におけるスループットを測定した。ここで、SHDSL モデムの伝送速度は、列車の制御に必要なデータ伝送速度（約 100kbps）と音声通話に必要なデータ量（約 100kbps/回線）、駅間距離やモデムで設定可能な伝送速度を考慮した結果、1.5Mbps に設定した。

### 3.1.2 地上一車上間通信

地上一車上間の通信には、2.2節で述べたように、IEEE 802.11a に準拠した無線 LAN を使用した。無線部分の伝送速度は、前節で述べた伝送が必要なデータ量と設定可能な速度を考慮して 6Mbps に設定した。アンテナは、無線機と一体で技術適合証明を取得している必要があるため、地上側には 1 台で垂直偏波および水平偏波の両偏波に対応した平面アンテナを、車上側には、偏波方式（垂直偏波・水平偏波）の異なる 2 つの平面アンテナをそれぞれ使用した。無線機の SSID（Service Set Identifier）は、異なる進行方向の列車との通信に用いる無線機との誤接続を防ぐため、列車の各進行方向に 1 つずつ設定した。さらに、同一通信エリア内で無線機を複数使用する場合、干渉による通信不具合を防止するため、各無線機の無線チャンネルが重ならないようにチャンネルを設定した。無線部分での暗号化については、市販の装置に標準搭載されている WPA2（Wi-Fi Protected Access 2）に基づく AES（Advanced Encryption Standard）方式を用い、認証は PSK（Pre Shared Key）方式を用いた。

測定では、車上側無線機を実列車に仮設し、車上無線機側での受信信号強度および、地上一車上間のスループットまたは応答時間を測定した。さらに、その結果を基に地上一車上間の通信可能エリアを確認した。ここで、電波の受信信号強度については、車上無線機の RSSI（Received Signal Strength Indication）を測定した。また、スループットの測定およびデータ伝送特性の確認は、中央管理装置の仮設機器室と車上間で行った。ここで、スループットの測定には回線特性測定ツール iperf による UDP（User Datagram Protocol）通信を、応答時間の測定には ping コマンドによるデータ伝送をそれぞれ用いた。

### 3.2 アンテナ配置

2.3節で述べた通信機器の設置方法に基づき、各駅に設置した機器の例を図 5 に、車上に設置した機器の例を図 6 にそれぞれ示す。

試験は、駅周辺に見通しがある駅と曲線により見通しがとれない駅のそれぞれに合わせた条件でアンテナを設置して行った。駅周辺の線路がほぼ直線であり、周囲の見通しが良い駅については、図 7 に示す D 駅のように

機器を配置した。一方、駅の進入側が急なカーブとなっている C 駅については、通信エリアを確保するために、駅の外方において、同一の進行方向にアンテナを 2 つ仮設した（図 8）。



図 5 電化柱に仮設した無線機およびアンテナ



図 6 運転台に仮設した機器

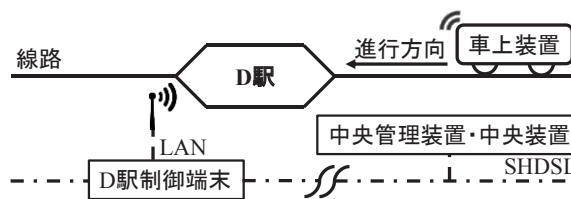


図 7 地上のシステム構成の例（D 駅）

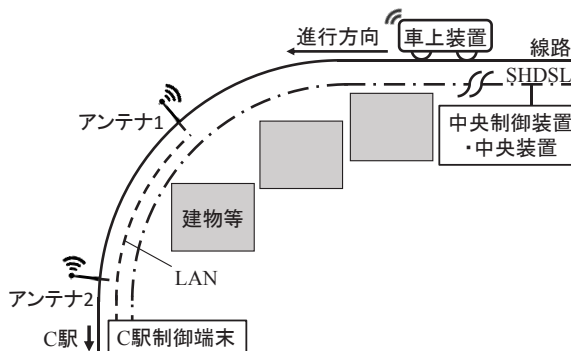


図 8 地上のシステム構成の例（C 駅）

特集：信号通信技術

4. 試験結果

4.1 駅間の通信品質測定

図9に示すような駅間のネットワークにおいて、各駅の制御端末間のSHDSL方式モデムを介したスループットを表1に示す。表1に示した結果より、いずれの駅間においてもモデムの設定値に近い1.4Mbpsのスループットが得られた。よって、SHDSLモデムにより、本システムに必要な駅間の伝送速度が確保できていることを確認した。

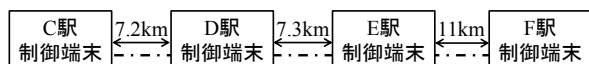


図9 駅間ネットワーク

表1 各駅間の距離およびスループット

	距離	スループット
C駅-D駅	7.2 km	1.4 Mbps (双方向)
D駅-E駅	7.3 km	1.4 Mbps (双方向)
E駅-F駅	11 km	1.4 Mbps (双方向)

4.2 中央管理装置 - 車上装置の通信品質測定

4.2.1 見通しの良い環境での測定結果 (D 駅)

図7に示したD駅に仮設したアンテナからの距離に対する、車上無線機の受信信号強度および中央管理装置-車上装置間のスループットの変化を図10に示す。図10に示した結果より、列車がアンテナから約800m離れた地点から中央管理装置-車上装置間の通信が行われていることがわかる。提案している列車制御システムでは、音声通話機能を除いた制御情報だけであれば、100kbps程度の伝送速度があれば十分機能を満足できることから、アンテナから約800m離れた場所から列車の制御が可能であるといえる。さらに、一部で受信信号強度の低下に伴うスループットの低下がみられたものの、約550mの距離で1.4Mbpsの伝送速度で通信できている様子が確認できる。なお、2.2節で述べたように無線区間は伝送速度を6Mbpsに設定しているにも関わらず、本試験結果のスループットが1.4Mbpsとなっているのは、中央管理装置を仮設した駅とD駅の駅制御端末間の有線部分の伝送速度が1.4Mbpsに制限されているためである。一方で、スループットが1.4Mbpsより大きい箇所があるのは、パケットの遅延等による合算によるものである。

4.2.2 見通しの悪い環境での測定結果 (C 駅)

図8に示したC駅について、遠方のアンテナ(アンテナ2)からの距離に対する車上無線機の受信信号強度および中央管理装置-車上装置間のデータ伝送に

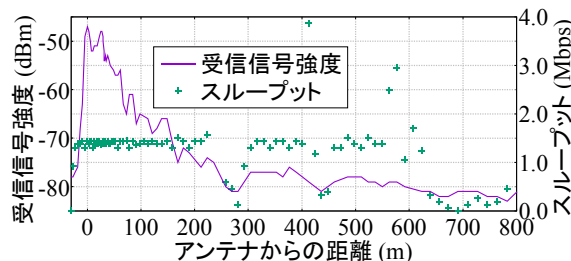


図10 通信特性の測定結果 (D 駅)

おける応答時間の測定結果を図11に示す。ここでは、IEEE802.11aの規格で定義されている機能ではないが、車上無線機が通信を行う地上無線機を高速で切り替える機能であるローミング機能の有無による比較も行った。図11に示した測定結果より、ローミング機能を無効にして測定した場合、アンテナ1を介した中央管理装置-車上装置間通信は可能であるものの、今回仮設したアンテナ間隔では、アンテナ2を介する通信に切替が完了できなかったことが確認できる。一方、ローミング機能を有効にした場合、アンテナ1からアンテナ2を介する通信への切替が行われたことが確認できる。これにより、ローミング機能がない場合と比較して、通信エリアが約100m拡大したことを確認した。さらに、応答時間の測定結果より、受信強度の確認だけでなく、データ伝送が可能であることを確認した。

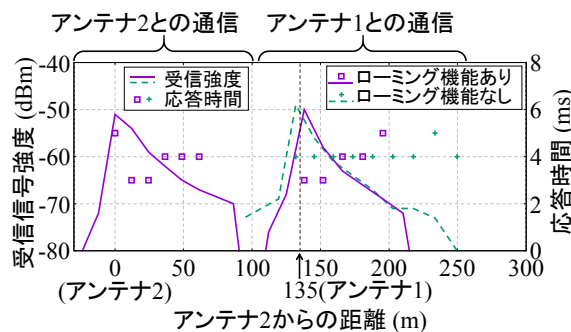


図11 ローミング機能による無線機の切替

5. 通信エリアの考え方

今回対象としている列車制御システムに拡張機能を実装する場合には、無線通信エリアについても拡張する必要がある。ここでC駅での測定結果から、拡張機能に関する通信エリアの考え方について検討を行う。一例として、何らかの理由により、駅へ進入する列車を緊急で停止させる機能(緊急停止機能)を、本システムで実現する場合に必要な通信エリアについて検討した。

図12に示すように駅に接近しようとする列車が止まるまでに必要とされる距離を  $x$  とする。当該線区の最高速度を  $V_0$ 、列車の減速度を  $a$ 、無線のリンクが確立してから情報が車上传わり、ブレーキ操作を開始するまでにかかる時間を  $t_1$ 、列車のブレーキ操作から制動開始までの時間を  $t_2$ 、制動開始から列車が止まるまでの時間を  $t_3$  とすると式(1)および式(2)が成り立つ。

$$t_3 = \frac{V_0}{a} \tag{1}$$

$$x = (t_1 + t_2 + t_3)V_0 - \frac{1}{2}at_3^2 \tag{2}$$

$V_0=75\text{km/h}$ 、 $a=2.1\text{km/h/s}$ 、 $t_1=3\text{s}$ 、 $t_2=3\text{s}$  と仮定すると、 $x=497\text{m}$  となる。列車が駅への進入を回避するには、D駅の場合にはアンテナから約300m離れた地点で停車させる必要があるため、無線通信エリアはアンテナから約797m確保する必要がある。前述したように提案している列車制御システムでは、制御情報のみであれば100kbps程度の伝送速度があれば十分であるため、図10に示した測定結果より、今回試験を実施したD駅であれば、アンテナから約800m離れた場所、すなわち駅構内の手前で列車を停車させることが可能であるといえる。さらに、非常停車した後も列車は無線通信エリア内にあるため、停止からの運転再開も無線により可能であると考えられる。なお、本拡張機能を実現する場合、機器等の故障で列車停止の制御情報が確実に車上に伝送できない事象が発生すると、そのまま列車は走り続け、駅構内に進入してしまうことが懸念される。そこで、例えばATS-Dxなどの保安装置が保有する車上データベースの位置情報と連携させて、車上のブレーキパターンを駅構内手前までとしておき、列車の進入に合わせてブレーキパターンを解除する方法や、位置情報から列車が無線通信エリアにいるかどうかを判定し、無線通信エリア内を列車が走行中には、周期的にパケットを送るとともに、一定時間届かない場合には列車を止める機能を持たせることで、フェールセーフ性を確保することが可能である。

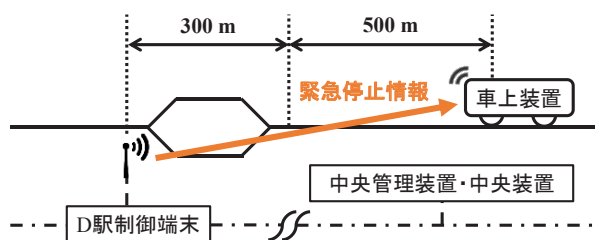


図12 緊急停止情報の伝送に必要な通信エリア (D 駅)

## 6. 今後の課題

### 6.1 導入予定線区を想定した無線回線設計

電波は大地や周囲の建物等の反射を受け、さまざまな経路で伝搬する(マルチパス伝搬)<sup>6)</sup>。特に鉄道環境においては、地上一車上間の伝搬を考慮した際、図13に示すような、地上無線機から車上無線機への直接波および大地を反射する反射波による伝搬が想定される。大地反射を考慮した伝搬は2波干渉モデルと呼ばれる伝搬モデルで推定が可能であり、波長を  $\lambda$ 、送受信のアンテナ高を  $h_t$ 、 $h_r$ 、送受信アンテナ間水平距離を  $d$  とすると大地反射を考慮した伝搬損失  $L$  は、式(3)および式(4)より算出される。なお、式(3)は  $h_t \ll d$ 、 $h_r \ll d$  を想定しており、大地の反射は水平に近い入射角であるため、反射係数は -1 と仮定する。

$$L = \left( \frac{\lambda}{2\pi d} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right) \tag{3}$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \tag{4}$$

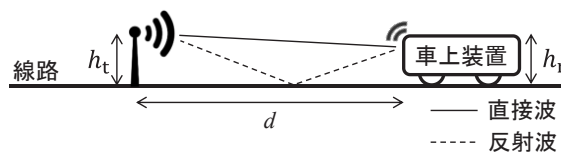


図13 2波干渉モデル

式(3)および式(4)に本検討の試験条件を代入して伝搬損失の距離特性を算出した結果を図14に示す。図14より、反射波による受信信号強度の落ち込みが多数発生することが確認できる。受信信号強度の落ち込みを解消するひとつの手法として、周波数の異なる複数のチャンネルを同時に用いた通信を行う方法が挙げられる。

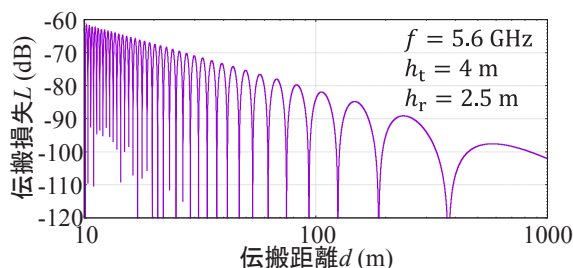


図14 距離に対する伝搬損失 (2波干渉モデル)

### 6.2 チャンネル干渉対策

無線通信では、通信の安定化を図る手法のひとつとして、干渉発生時にチャンネルを変更する方法がある。しかし、その一方、チャンネルの変更時に一時的に通信が

## 特集：信号通信技術

できない時間が発生し、列車が通信エリアを走行するタイミングと重なると、地上-車上間の通信に支障をきたす恐れがある。そこで、干渉発生時の無線機の挙動を把握するとともに、チャンネル切替に要する時間の測定等を行い、干渉による影響およびその対策案を検討する必要がある。

なお、チャンネル切替については、同一周波数帯(5GHz帯)だけでなく、IEEE802.11b/g<sup>7)</sup> 8) (2.4GHz帯)の無線LANも活用した対策も視野に入れた検討を予定している。

## 6.3 DFS機能動作時の挙動

本検討で用いた通信規格IEEE802.11aの周波数帯は、各種レーダー(船舶、航空等)と周波数を共用している。そのため、屋外で利用する際には、使用チャンネルでレーダーの信号を検知した場合に、当該チャンネルの電波を30分間停止する機能(DFS機能)を備えるよう、電波法により定められている。近年では、通信を行いながら他チャンネルの状態を監視しておき、レーダー信号を検知した場合には、短時間で他のチャンネルに切り替える機能を備えた無線機が市販されている。そこで、当該機能によるチャンネル切替時間を把握し、前節のチャンネル干渉時と同様にその影響と対策案の導入を検討する必要がある。

## 6.4 他の無線システムによる実現可能性の検討

本稿ではこれまで、低コストでシステムを実現させるため、市販の5GHz帯の無線LANを前提に検討を進めてきた(一部で2.4GHz帯無線LANの活用も検討)。しかし、干渉問題等を想定する対策案で解決することが困難な場合に備えて、特定小電力無線や総務省への登録が必要な4.9GHz帯の無線LAN<sup>9)</sup>、業務用無線等によるシステム実現の可能性についても検討を行う必要がある。

## 7. おわりに

本検討では、地方交通線向け列車制御システムへの汎用通信技術の適用を目指し、営業線において5GHz帯無線LANとSHDSLモデムを用いたネットワークを提案するとともに、通信性能の検証試験を行った。その結果、システムの基本動作に必要な情報の伝送が可能なことを確認した。今後は、実用化に向けた課題の解決方法の検討を行うとともに、長期運用による安定性の確認を通して、汎用通信技術の地方交通線向け列車制御システムへの適応を目指していく予定である。

## 謝辞

本研究の検証試験の実施にあたりご協力頂いた九州旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝の意を表する。

## 文献

- 1) 吉武勇, 明本昭義: 運転保安設備の解説, pp.4-12, 1984
- 2) 杉山陽一, 寺田夏樹, 中村一城, 岸本悟, 原田宗幸, 久永雅子, 佐藤和敏, 吉成慶介: 地方交通線向け列車制御システムの検討, 信学技報, Vol. 117, No. 100, SSS2017-10, pp. 15-18, 2017
- 3) 寺田夏樹, 小野雄人, 新井英樹, 中村一城, 岸本悟, 原田宗幸, 久永雅子, 田中和弘, 渡邊理: 地方交通線向け列車制御システムの開発, 信学技報, Vol. 118, No. 100, SSS2018-8, pp. 5-8, 2018
- 4) 小野雄人, 寺田夏樹, 中村一城, 原田宗幸, 久永雅子: 地上設備の削減を目指した地方交通線向け列車制御システムの開発, 鉄道と電気技術, Vol. 29, No. 10, 2018
- 5) IEEE 802.11a-1999, "IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band," IEEE, 1999.
- 6) 細矢良雄(監修): 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社, 1999
- 7) IEEE 802.11b-1999, "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and Metropolitan networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band," IEEE, 1999.
- 8) IEEE 802.11g-2003, "IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band," IEEE, 2003.
- 9) 802.11j-2004, "IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications--Amendment 7:4.9 GHz-5 GHz Operation in Japan," IEEE, 2004.