

交通流を考慮した狭アンテナビーム切替制御方式の伝送特性評価

間瀬 公太[†] 前島 治[‡] 井上 順治[†] 木津 雅文[†]

[†]株式会社トヨタ IT 開発センター 研究開発部 〒107-0052 東京都港区赤坂 6-6-20

[‡]株式会社 KDDI 研究所 開発センター 〒102-8460 東京都千代田区飯田橋 3-10-10

E-mail: [†] {mase, ju-inoue, kizu}@jp.toyota-itc.com, [‡] os-maeshima@kddilabs.jp

あらまし 交通事故低減に向け、路車間通信を用いた安全運転支援システムが検討されている。このようなシステムでは、情報伝達の即時性および高信頼性が求められており遮蔽、多重反射等による電波伝搬特性の劣化に対する耐性が必要となる。これまでに筆者らは、複数パターンの狭アンテナビームを用いて情報フレームを連送することによりパケット誤り率 (PER) 特性を改善する狭アンテナビーム切替制御方式の検討を行い、路側機と車両 1 台の通信環境で提案方式の有効性を示した。本稿では、建物等の周辺地物に加え、電波伝搬環境に影響を及ぼすと考えられる車両交通流を考慮した条件での伝送特性の評価に基づき、提案方式が伝送品質の改善に有効となる条件について報告する。

キーワード ITS, 交通流, 路車間通信, 狭アンテナビーム切替

Transmission Performance Evaluation of a Roadside-to-Vehicle Communication System Using Antenna-beam-switching Technique Based on a Model of Traffic Flow

Kota MASE[†] Osamu MAESHIMA[‡] Junji INOUE[†] and Masafumi KIZU[†]

[†] TOYOTA InfoTechnology Center Co., Ltd 6-6-20 Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-0052 Japan

[‡] KDDI R&D Laboratories Inc., 3-10-10 Iidabashi, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8460 Japan

E-mail: [†] {mase, ju-inoue, kizu}@jp.toyota-itc.com, [‡] os-maeshima@kddilabs.jp

Abstract The roadside-to-vehicle communication (RVC) system has been proposed as a new solution to reduce traffic accidents and traffic congestion. Since its target includes vehicle safety related applications, low latency and high reliability become the crucial requirements for the system, which increases the difficulties of system design under a dynamic traffic environment. So far, we have proposed a RVC system using narrow antenna beam switching technique to enhance reliability by transmitting the same data frames with multiple antenna beams. In this paper, we performed system evaluation based on a model of traffic flow through computer simulation, and conclude on certain conditions which this technique is very useful to avoid the degradation of radio wave propagation due to shadowing and multipath fading, therefore increase the communication reliability.

Keyword ITS, Traffic flow, Roadside-to-vehicle communication, Narrow antenna beam switching

1. はじめに

今後の ITS 発展の重要なテーマとして、「環境・効率」、「快適・利便」に加え、無線通信を活用した安全運転支援による「安全・安心」が掲げられている [1][2]。

ITS における無線通信システムのうち、路車間通信については、5.8GHz 帯を用いた DSRC (Dedicated Short Range Communication: 狭域通信) が自動料金支払システム (ETC) 等で実用化されている。一方、安全運転支援システムの場合、交通ルール違反、見落とし、認

知ミス等の解決が目的となるため、サービスエリアの広域化や周辺車両に対する情報伝達の即時性・高信頼性が要求される。このため、安全運転支援システムの実用化には、建物や車両交通流によって発生する電波の遮蔽、多重反射が存在する環境においても通信品質を確保する技術が必要となる。

これまでに筆者らは、路車間通信環境において緊急性の高い通信の成功率を向上させるための手法として、単一の路側機における複数パターンの狭アンテナビー

ムを用いて情報フレームを連送する路車間通信方式を提案してきた[3][4]。従来技術では、複数の路側機による同時送信を用いた路車間通信システムが提案されているが[5][6]、通信エリアあたりに要する通信容量コストを考慮すると、単一の路側機で、より高品質なサービスを提供できることが望ましい。また、路車間通信システムの評価において、路側機周辺における車両交通流の影響を考慮した PER 等の伝送特性評価を実施した例は少ない。

本稿では建物や交通流による電波伝搬環境の変動をレイトレースにより解析し、レイトレース結果から得られた電波伝搬モデルを用いたシミュレーションにより伝送特性を評価することで提案方式が従来方式に比べ伝送品質改善に有効となる条件を明らかにした結果を報告する。

2. 路車間通信システム

2.1. 狭アンテナビーム切替制御方式

自車両と路側機との見通しが大型車両等により遮蔽される状況においても路車間の通信品質を確保するため、筆者らは路側機アンテナのビーム幅を絞り、一定周期で複数の方向に切り替えて同じ情報を送信することにより通信成功率を高める狭アンテナビーム切替制御方式を考案した。本方式では受信電力の改善及びマルチパスフェージングの低減が期待でき、周辺地物からの反射波を積極的に活用することにより遮蔽領域における受信車両の PER 特性を改善しうることをシミュレーションおよび実験により確認している[3][4]。本方式の動作原理を図 1 に示す。この例では、4 種類のビームを水平方向にオフセットさせている。

2.2. 評価システム諸元

評価システムの主要諸元について、無線諸元を表 1 に、路側アンテナ諸元を表 2 に、それぞれ示す。具体的な無線仕様は主に欧米等で車両通信規格として検討されている IEEE 802.11p 規格案に基づいており、変調方式は OFDM 変調を用いた[7]。また、路側アンテナについて提案方式のビーム切替（評価用）では 4 種のビームを設定し、路側機から 100m 離れた地点において、ビーム 1 の水平面内主ビームが 2 車線道路の中心に向くよう方路方向から 2.5 度の角度とした。ビーム 2 以降は 15 度ずつシフトさせ、通信エリア全体を効率的にカバーできる設定とした。一方、従来方式の広角（比較用）では水平面内主ビームがビーム 1-ビーム 4 の中央となるよう方路方向から 25 度の角度とした。

2.3. 車両交通流の統計モデル

図 2 に示す片側 2 車線の道路を想定し、適用する車両交通流の統計モデルには、車間距離の走行に要する時間 τ_i の確率密度関数が

$$p(\tau_i) = \frac{(k\mu)^k}{(k-1)!} \tau_i^{k-1} e^{-k\mu\tau_i} \quad (1)$$

で与えられるアーラン分布を導入する[5]。

但し、 $1/\mu$ [s] は平均車頭時間、 k はアーラン分布の位相パラメータを示す。

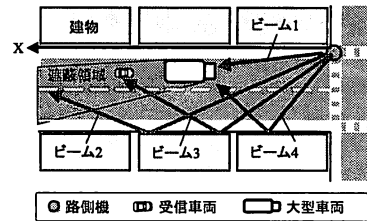


図 1. 狭アンテナビーム切替動作原理 (4 ビームの例)

表 1. 無線諸元

項目	仕様
中心周波数	5800MHz
占有帯域幅	8.3MHz
変調方式	OFDM
誤り訂正符号	畳み込み符号
サブキャリア数	52 (うちパイロット数 4)

表 2. 路側アンテナ諸元

項目	ビーム切替 (評価用)	広角 (比較用)
水平面内 主ビーム方向*	ビーム 1 2.5 度	25 度
	ビーム 2 17.5 度	
	ビーム 3 32.5 度	
	ビーム 4 47.5 度	
利得	12dBi	7.9dBi
半値角	18 度	80 度

*図 1 の X 軸を基準とする方位角 (反時計回りを正)

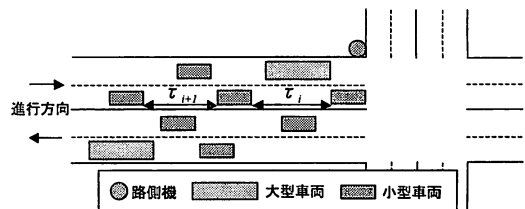


図 2. 車両交通流の統計モデル

車両は小型車両（全長 4.7m、全幅 1.7m、全高 1.5m）と大型車両（全長 12.0m、全幅 2.5m、全高 3.8m）の 2 種を完全導体の直方体でモデル化した。また、車両交通流に占める大型車両台数の割合を大型車両含有率（Large vehicle Ratio: LVR）で定義した。

車間距離、LVR に加え、車速を含めた評価用車両交通流の統計モデルパラメータ一覧を表 3 に示す。表 3 の 3 種の交通流について、同一パラメータを用いたアーラン分布に従う交通流を対向 2 車線を含む全 4 車線分生成した。2.4 節に示すレイトレースではこれらの車両を固定の距離ステップ毎に移動させ、通信エリア内における車両の中心を受信点として電波伝搬特性を計算した。

表 3. 車両交通流パラメータ一覧

項目	1	2	3
車速[km/h]	10	60	
平均車頭時間 (1/μ) [s]	0.581	0.893	
LVR[%]	10	10	40
位相パラメータ (k)	6		

2.4. レイトレースモデル

片側 2 車線の交差道路一角に路側機を設置した環境を想定し、図 3 に示すレイトレースモデルとして、(a) 建物あり、(b) 建物なし、それぞれの通信エリア 100m を評価対象とした。但し、(a)における建物は 25m 立方のコンクリート、(b)における地面は乾土とする。一般道路（縦）の車両は信号待ちを仮定し、セットバック 5m の位置とその車両から車頭間隔 8m の位置に車線あたり 2 台を停車させ、優先道路（横）の車両に対する電波伝搬特性を評価する。優先道路車両の配置は 2.2 節の車両交通流の統計モデルに従う。尚、レイトレースにおける反射回折条件は、反射が 2 回まで、回折が 2 回まで、反射・回折の合計が 2 回までのいずれかとし、車線あたり 500 台に対し通信エリア内 100 点を計算した。

2.5. リンクブロッキング率 (LBR) の定義

評価対象車両の受信電力が最低受信感度を下回る状態をリンクブロッキング (LB) と定義し、LB の発生頻度を表す LBR を以下のように定義する。

$$LBR = \left\langle \frac{\text{通信エリア通過時のLB発生地点の総数}}{\text{通信エリア通過時の計算地点総数}} \right\rangle \quad (2)$$

但し、 $\langle \cdot \rangle$ は全車両の集合平均である。

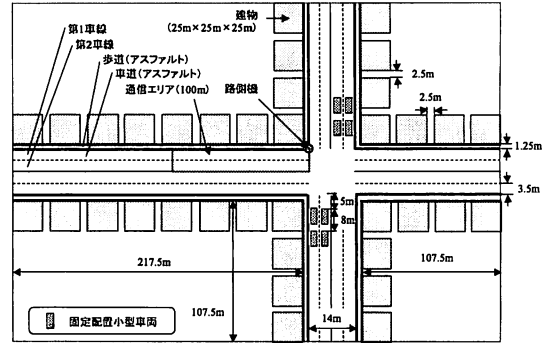
また、LB 判定に用いる値として、評価システムの各変調方式に関する最低受信感度を表 4 に示す[8]。

従来方式では、常に同一のアンテナから送信するた

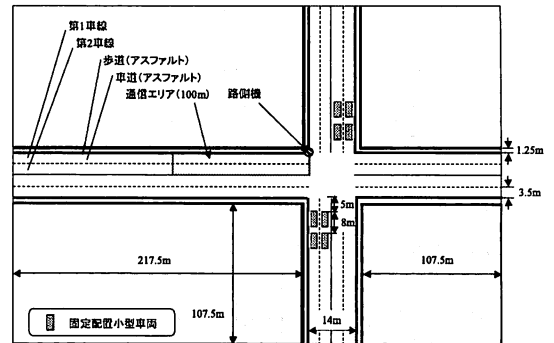
め、各地点の受信電力で LB を判定するが、提案方式では、4 ビームを瞬時に切り替えて送信することを前提とし、各地点の 4 アンテナによる受信電力のうち、最大値を LB の判定に用いた。

2.6. PER 算出方法

伝送シミュレーションを効率的に実施するため電波伝搬特性を特徴づけるパラメータと PER 特性を対応付ける PER データベース (DB) を導入する。



(a)建物あり



(b)建物なし

図 3. レイトレースモデル

表 4. 各変調方式に関する最低受信感度

変調方式	符号化率	最低受信感度 (dBm)
BPSK	1/2	-85
QPSK	1/2	-82
16QAM	1/2	-77
64QAM	3/4	-68

表 5. PER DB パラメータ

フェージング	パラメータ
レイリー	遅延スプレッド、CNR
仲上-ライス	遅延スプレッド、CNR、 K ファクタ、最大受信素波到来角

レイリーフェージング及び仰上-ライスフェージングについてPER DBを構成するパラメータを表5に示す。ここで、CNRは受信電力と熱雑音($kTBF$)の比とし、遅延プロファイルに指数減衰モデルを用いてDBを作成した。尚、 k はボルツマン定数($=1.38 \times 10^{-23}$ [J/K])、 T は都市温度($=293.15$ [K])、 B は帯域幅($=8.3$ [MHz])、 F は受信機の雑音指数($=6$ [dB])を用いた。評価システムについて、一次変調方式にQPSKを用いた場合のPER DBを図4に示す。これらをもとに以下の手順でPERを算出した。

1. レイトレースにおける最大受信電力 P_D の素波とその到来角を求める。
2. P_D とその他素波の受信電力の合計 P_R との電力比 P_D/P_R をKファクタとし、 $K \geq 1$ ならば仰上-ライスフェージング、 $K < 1$ ならばレイリーフェージングとする。
3. 各地点のレイトレース結果より表5に関するパラメータを抽出し、DB参照結果から1フレーム送信時のPERを求める。
4. 広角4連送時及び4ビーム切替時におけるPERの算出方法を(3)式に定義し、1フレーム送信時のPERを用いてそれぞれを算出する。

$$PER = \begin{cases} PER_{omni}^4 & (\text{広角4連送}) \\ \prod_{i=1}^4 PER_{beam(i)} & (\text{4ビーム切替}) \end{cases} \quad (3)$$

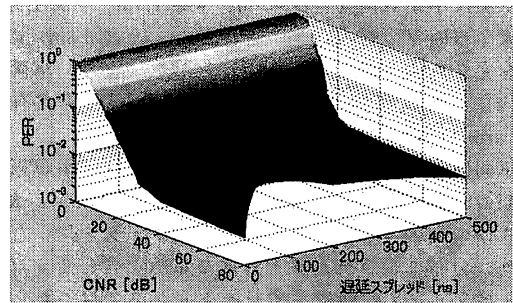
3. 伝送特性

3.1. LBR 特性

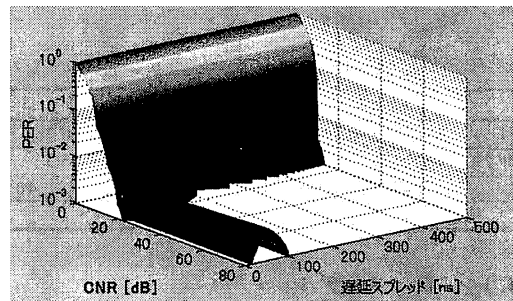
従来方式である広角と提案方式であるビーム切替のLBR特性を比較するため、LVRをパラメータとした場合の建物あり、車速60km/hにおけるそれぞれの最低受信感度対LBR特性を図5に示す。広角、ビーム切替ともにLVRの増加に伴いLBRが劣化し、大型車両の遮蔽による影響が確認できる。但し、ビーム切替の場合、広角よりもLVRの影響が大きい。これは、大型車両の割合が増加することで対向車線における建物からの反射波が遮蔽される確率が高くなったためと考えられる。

ビーム切替によりLVR 40%では受信感度-82dBm(変調方式QPSK)において、LVR 10%では受信感度-77dBm(変調方式16QAM)において、それぞれ広角のLBRを1/100程度に低減しうる結果を得た。

次に、車速をパラメータとした場合の建物あり、LVR 10%における広角とビーム切替の最低受信感度対LBR特性を図6に示す。車速10km/hにおける交通流は渋



(a)レイリーフェージング



(b)ライスフェージング (K=5、到来角 0 度)

図4.一次変調方式QPSKにおけるPER DB
(車速60km/h、パケットサイズ100Byte)

滞流に相当する平均車頭時間であり車両密度が密なることから、伝搬損失に影響を受け車速60km/hに比べ特性が悪い。ビーム切替によるLBR改善は図5と同様の傾向を示した。

さらに、道路周辺の建物有無をパラメータとした場合の車速60km/h、LVR 10%における広角とビーム切替の最低受信感度対LBR特性を図7に示す。建物なしの場合、ビーム切替によるLBR改善効果は建物ありに比べ低く、LBR 10^{-2} における受信電力の差はアンテナ利得差程度の改善に留まった。したがって、周辺に建物がない環境では、受信電力の改善に有効となる反射は得られず、対向車線を走行する大型車両等からの反射は期待できないことがわかった。

3.2. PER 特性

建物あり、車速60km/hにおける広角4連送、4ビーム切替をLVRで比較した場合のPER累積確率分布を図8に示す。LVRに関わらず4ビーム切替が概ね優位となり、LVR 40%の場合、4ビーム切替が広角4連送のPERを累積確率分布50パーセントイルで約1/20、90パーセントイルで約1/4に低減した。また、LVR 10%に比べ、LVR 40%の方が分布差を広げる傾向を示した。

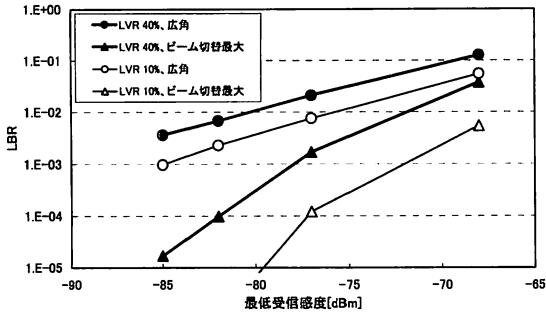


図 5. LVR 比較による最低受信感度対 LBR 特性 (建物あり、車速 60km/h)

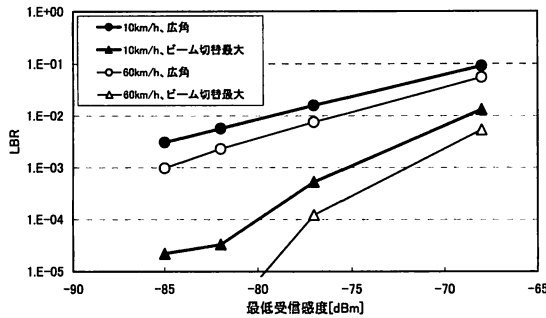


図 6. 車速比較による最低受信感度対 LBR 特性 (建物あり、LVR 10%)

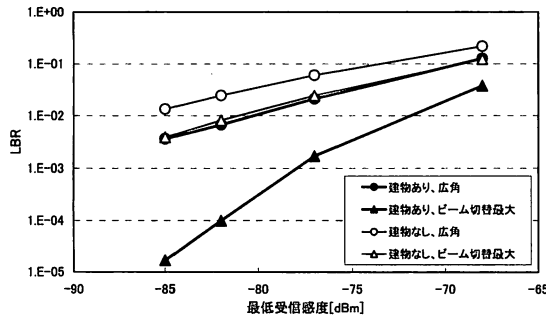


図 7. 建物有無比較による最低受信感度対 LBR 特性 (LVR 40%、車速 60km/h)

これは図 5 の傾向とも一致し、4 ビーム切替により、同一車線の大型車両の遮蔽で見通し外となる小型車両の受信電力を改善した一方で、場所によって対向車線の大型車両の遮蔽で受信電力の改善が抑えられたためと考えられる。

次に、建物あり、LVR 10%における車速で比較した場合の PER 累積確率分布を図 9 に示す。車速 60km/h の場合、4 ビーム切替が優位となり、累積確率分布 50 パーセントでは約 1/17、90 パーセントでは約

1/4 に PER が低減された。一方、車速 10km/h の場合、それぞれ良好な品質が保たれているものの、広角 4 連送の方が 4 ビーム切替より優れた特性を示した。これは図 6 に示す LBR 特性と逆の傾向であり、受信電力のみの評価から原因は類推し難いが、ドップラーシフトの影響が少ない低速時には OFDM の持つマルチパスフェージング耐性が広角アンテナの品質劣化を抑制したものと考えられる。

さらに、車速 60km/h、LVR 10%における道路周辺建物有無で比較した場合の PER 累積確率分布を図 10 に示す。建物ありの場合、前述の通り 4 ビーム切替が優位となった。一方、建物なしの場合、広角 4 連送の方が 4 ビーム切替より優れた特性を示した。これは図 7 の結果からもわかる通り、4 ビーム切替において対向車線側の建物による反射がなくなり受信電力の改善が得られなくなったためと考えられる。ここでは、LVR 40%と比較的対向車線に大型車両が多く存在するモデルを用いているものの受信電力が改善されていないことから、本稿における評価環境においては道路周辺の建物による反射が受信電力改善の支配的要素であると言える。

4. まとめ

4 ビーム切替による狭アンテナビーム切替制御方式を用いる場合の路車間通信システムについて、交通流を考慮した伝送特性を評価した。その結果、以下の条件において従来方式に比べ伝送品質が改善されることを確認した。

1. 車両交通流に占める大型車両の割合が 40%以下であれば、車両密度によらず提案方式が有効である。
2. OFDM 変調を用いるシステムの伝送品質は、車両による遅延広がりの影響に比べ、車速による伝搬特性変動の影響を受けやすいことから、高速移動時などの伝搬路推定精度を救済する面で有効である。
3. 道路周辺に建物が存在し、受信電力改善に有効な反射を得られる環境において、提案方式が有効である。

したがって、事故多発地点の路側機設置環境における提案方式の適用に際し、周辺地物の配置状況に応じたビーム切替の要否、アンテナの指向方向、ビーム数、再送方法などを検討する必要がある。今後は、安全運転支援システムとして運用条件や所要品質の要求を満足させるため、提案方式の最適化について検討していきたい。

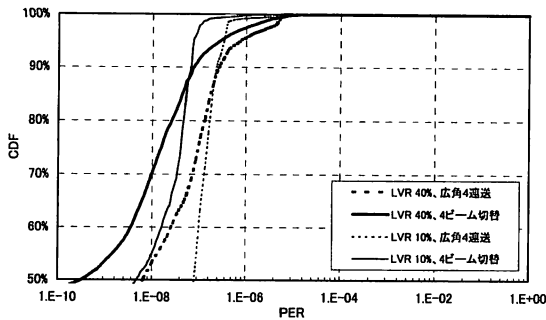


図 8.LVR 比較による PER 累積確率分布
(建物あり、車速 60km/h)

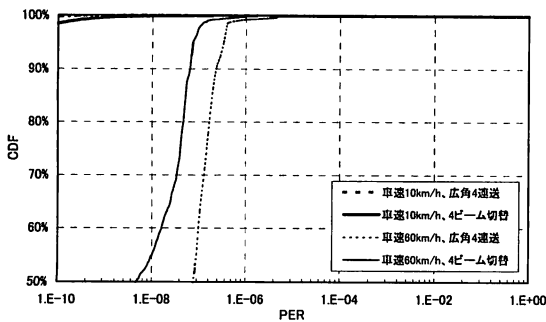


図 9.車速比較による PER 累積確率分布
(建物あり、LVR 10%)

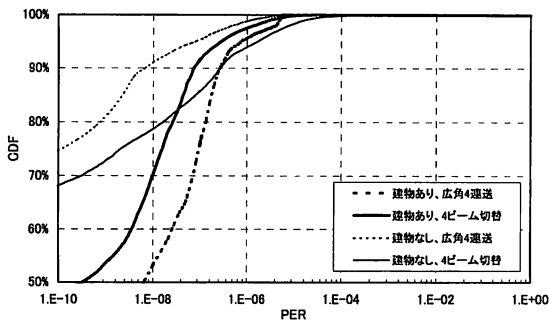


図 10.建物有無比較による PER 累積確率分布
(LVR 40%、車速 60km/h)

本研究は、独立行政法人情報通信研究機構からの受託研究「ユビキタス ITS の研究開発」に基づき実施したものである。

文 献

- [1] 総務省, “「ワイヤレスブロードバンド推進研究会」最終報告書,”
http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/pdf/051227_1_4.pdf.
- [2] I T 戦略本部, “I T 新改革戦略,” pp.19-20, 2006,
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/060119hobun.pdf>.
- [3] O.Maeshima, S.Cai, T.Honda, H.Urayama and A. Taira, “Transmission performance evaluation of a roadside-to-vehicle communication system with antenna beam switching,” in Proc. The 3rd International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications, ISTANBUL, 2007, pp.35-41.
- [4] 前島治 他, “狭アンテナビーム切替を用いた路車間通信装置の試作と伝送特性評価,” 信学会信学技報, ITS2007-84, pp.35-40, 2008年3月.
- [5] 今尾勝崇 他, “路車間通信システムにおける複局同時送信による実効セル面積拡張のための分散アンテナ配置法の検討,” 信学会論文誌 C, Vol.J88-C No.12, pp.1082-1095, 2005年.
- [6] 宮長健二 他, “STD-T75 規格に PSK-VP 複局方式を適用構成した路側ダイバーシチのフィールド実験結果,” 信学会信学技報, MoMuC2003-83, pp.13-18, 2004年1月.
- [7] 林正人 他, “予防安全のための車両通信技術—動向と研究開発—,” 日立評論, Vol.88 No.08 640-641, pp.38-41, 2006年8月.
- [8] IEEE P802.11p/D1.2, pp37-63, March 2005