

全二重通信を用いた車車間協調伝送手法の検討

加藤芳生¹ 岡本英二¹

概要：自動運転の実現には高品質な無線通信が必要であるが、車両が基地局に対して遠方に存在する場合、伝搬損失が大きく通信品質が低下してしまう。これまで我々は、遠方車両の信号を他車両を中継し、伝送することで電波の減衰を抑える車車間協調伝送手法を検討してきた。しかし、従来の協調伝送では半二重通信を使用していたため、車両が基地局に直接伝送した場合に比べてスループットが半分となっていた。そこで本稿では、全二重通信を車車間協調伝送に適用することで直接伝送とほぼ同じスループットを有する手法を提案し、計算機シミュレーションにより本手法が優れた伝送効率を有していることを示す。

キーワード：車車間協調伝送, 全二重通信, 高度道路交通システム

A Study on Inter-Vehicle Cooperative Transmission Method Using Full-Duplex Communication

YOSHIKI KATO^{†1} EIJI OKAMOTO^{†1}

Abstract: High-quality wireless communication is indispensable for the realization of autonomous driving. However, when a vehicle is far away from a base station, the communication quality is degraded due to large propagation loss. We have studied a cooperative transmission method between vehicles that suppresses the radio wave attenuation by relaying the signal of the distant vehicle to another closer vehicle for transmission. However, the conventional cooperative transmission method uses half-duplex communication, and the throughput is half of that when vehicles transmit directly to the base station. Therefore, in this paper, we propose a method to apply full-duplex communication to inter-vehicle cooperative transmission, which has almost the same throughput as that of direct transmission, and show that this method has excellent transmission efficiency by numerical simulations.

Keywords: Inter-vehicle cooperative transmission, Full-duplex, Intelligent transport systems

1. はじめに

近年、自動運転の実現に向けて無線通信への注目が高まっており、自動車と様々なモノをつなぐ V2X (vehicle-to-everything) 通信が盛んに研究されている[1][2][3][4][5][6]。その中でも V2N (vehicle-to-cellular-network) を活用した車両におけるマルチメディアサービスが注目されており[7]、安定したサービス提供のため高品質通信が求められている。しかし、車両が基地局 (base station: BS) に対して遠方に存在する場合、伝搬損失が大きいため通信品質が低下してしまう[8]。この課題を解決するために我々はこれまで基地局に対して遠方に存在する車両 (far terminal: FT) の信号を比較的基地局に近い中継車両 (relay terminal: RT) を経由して伝送することで通信品質の劣化を抑える車車間協調伝送手法を検討してきた[9]。協調伝送手法で情報を伝送する場合は FT から RT, RT から BS の 2 ステップを必要とし、通常は送受信を交互に切り替えて伝送を行う半二重通信方式を使用するため 2 ステップ目で RT が基地局へ送信している間 FT が RT に送信することができない。そのため、基地局と直接通信する場合に比べて伝送効率が半分になってしまっていた。そこで、協調伝送手法に対して同じ周波数帯で送受

信を同時に行う全二重通信方式[10]を RT に適用することにより、FT から RT へ信号を継続的に行うことが可能となり伝送効率の低下を防ぐことができる。しかし、全二重通信では送受信を同時に行うことから自らの送信信号を所望の受信信号とともに受信してしまう自己干渉が生じ、通信品質が劣化してしまうため、自己干渉を抑制することが重要となる。自己干渉除去の方法として、干渉キャンセル回路や鋭いビームフォーミングの適用などが挙げられ、現在はそれらを備えた基地局において全二重通信の導入が検討されている[11]。将来的には車両端末においても全二重通信の導入が期待されており、全二重通信を車両通信に適用した研究が進められている。しかし、これまでの検討では、リンクレベルでの性能解析に留まり[12][13]、システムレベルでの検討はなされていなかった。そこで、本稿では全二重無線通信器を持つ車両端末による車車間協調伝送を行う全二重協調伝送において、実環境に則したシステムを交通シミュレータを用いて構築し、システムレベルでのシミュレーションを行うことで全二重協調通信がより実環境に近いシナリオにおいて有効であることを明らかにする。

以降、第 2 節でシステムモデル、第 3 節で提案手法のシ

¹ 名古屋工業大学

システム構成について説明し、第 4 節でシミュレーションシナリオについて紹介する。第 5 節では交通モデリングソフトを用いた計算機シミュレーションによる伝送特性の評価を行う。最後に、第 6 節で結論を述べる。

2. システムモデル

図 1 に示すように基地局のカバレッジ内に U 台存在する車両から BS へ情報を伝送する上りリンク通信を行うシステムモデルを考える。多元接続方式は直交周波数分割多元接続 (orthogonal frequency division multiple access: OFDMA) [14] とする。基地局は、カバレッジ内の車両を位置情報とチャネル状態から、中継局にデータを送信する FT、全二重通信方式により FT からの信号を基地局へ中継する RT、自身の信号のみを直接伝送する直接通信車両 (direct terminal: DT) に分類する。FT と RT のペアリング方法については 3.2 節で説明する。図 2 に FT, DT, RT, BS のシステム構成を示す。送信する車両は、 K ビットのデータ系列 $\mathbf{d}$ ($\in \{0,1\}^K$) を誤り訂正符号化し、 L ($> K$) ビットの符号化系列 $\mathbf{b}$ ($\in \{0,1\}^L$) を得る。 $\mathbf{b}$ に対して、線形変調を施しシンボル系列 $\mathbf{s}$ ($\in \mathbb{C}$) が得られる。そして通信路容量に基づいて周波数割り当てを行い、IFFT (inverse-Fourier transform) をすることで送信系列 $\mathbf{x}_{FT}$ ($\in \mathbb{C}$) を作成する。ただし、提案システムにおける周波数割り当てでは、ユーザ間の公平性を考慮し、割り当てられるサブキャリア数は全ユーザが同数とする。そのため、使用する帯域のサブキャリア数を N_c としたとき、1 ユーザに割り当てられるサブキャリア数 N_u は

$$N_u = \left\lfloor \frac{N_c}{U} \right\rfloor \quad (1)$$

で与えられる。ここで $\lfloor a \rfloor$ は a 以下の最大の整数を表す。また、 j 番目のサブキャリアに割り当てられるユーザ番号 $u(j)$ は、proportional fairness (PF) 法[15]により次式のように求められる。

$$u(j) = \underset{i}{\operatorname{argmax}} \left(\frac{C_{i,j}}{\frac{1}{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} C_{i,j}} \right) \quad (2)$$

ここで $C_{i,j}$ はユーザ i ($\in [0, U)$) の j 番目のサブキャリアにおける通信路容量を示している。瞬時利得と平均利得の比により割り当てるユーザを決定するため、全サブキャリア帯域において他のユーザより通信路利得が低いようなユーザに対してもサブキャリアを割り当てることが可能である。ただし、あるユーザがサブキャリアの割り当て上限 N_u に達した場合、そのユーザは取り除いて(2)式を行う。RT の受信信号 $\mathbf{r}_{RT}$ は

$$\mathbf{r}_{RT} = \mathbf{h}_{FT} \mathbf{x}_{FT} + \mathbf{h}_a \mathbf{x}_{RT} + \mathbf{n}_{FT} \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\mathbf{h}_{FT}$, $\mathbf{h}_a$, $\mathbf{x}_{RT}$, $\mathbf{n}_{FT}$ はそれぞれ FT-RT 間のチャネル係数、RT の自己干渉チャネル係数、RT の送信系列、FT-RT 間の雑音である。この受信信号に対して、まず

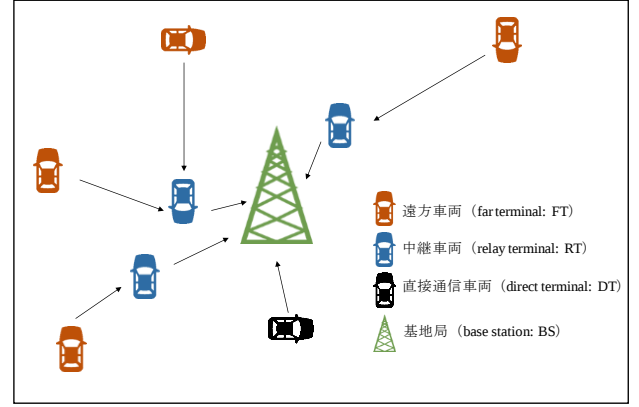


図 1 システムモデル

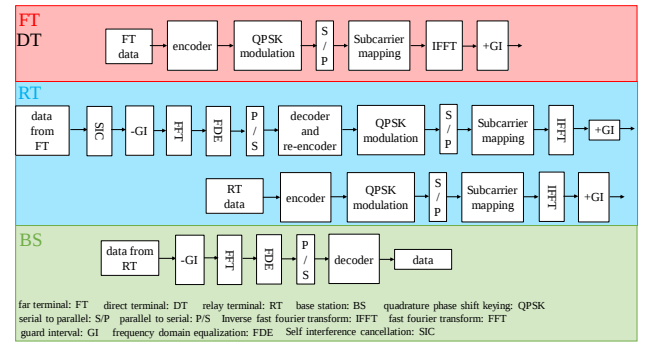


図 2 提案システム構成

RT では自己干渉除去が行われる。本稿では、文献[16]に従い 110 dB の干渉除去が行えることを想定する。その後、干渉除去を行った系列に対して、復調・復号を行い、再符号化・再変調して伝送を行う decode and forward (DF) 方式を実施する。協調伝送における中継局の信号処理には受信した信号をそのまま増幅して送信する amplifier and forward (AF) 方式と前述の DF 方式がある。DF 方式は復号してから送信するため遅延が大きい、AF 方式よりも雑音の影響を低減することができる[17]ため提案手法では DF 方式を採用する。BS では、RT から受信した信号を復調・復号を行う。

3. 提案システム構成

3.1 全二重通信方式

現在無線通信で主に使用されている通信方式を半二重通信方式といい、これは送受信を交互に切り替えて行う方式である。この方式に対して、同じ周波数帯で送受信を同時に行う通信方式を全二重通信という。図 3 に全二重通信器の構成を示す。全二重通信では、送信アンテナからの自信号が回り込ことで他端末からの所望信号に自信号が重畳された信号を受信してしまう。これを自己干渉といい、これを除去するためにアナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路が必要となる。アナログキャンセル回路では、自身が送信している信号の逆位相かつ同振幅の信号を生成して受

信号に重畳することで自身が送信している信号のみを除去する。デジタルキャンセル回路では、保持していた D/A 変換前の送信信号と A/D 変換後の受信信号との相関を取り、相関のピークを検出した部分で受信信号から保持していた送信信号を減算することで干渉を除去する。以上の処理を行うことで自己干渉を除去できる[18]。提案するシステムにおける各タイムスロットでの操作を図 4(a)に示す。タイムスロット n では FT は RT へデータ伝送を行い、RT ではタイムスロット $n-1$ で FT から受信した信号を DF 方式で BS に向けて送信する。RT では自己干渉が発生するため、干渉成分を取り除いて復号を行う必要がある。一方、図 4(b)に示す従来の半二重通信を用いた協調伝送では送受信を同時に行えないため、タイムスロット n において RT-BS 間の通信が行えず全二重協調通信に比べスループットが低い。

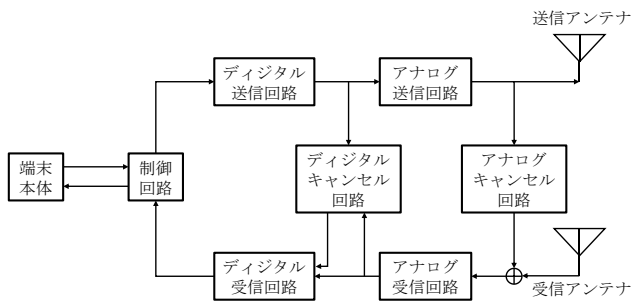


図3 全二重通信器の構成

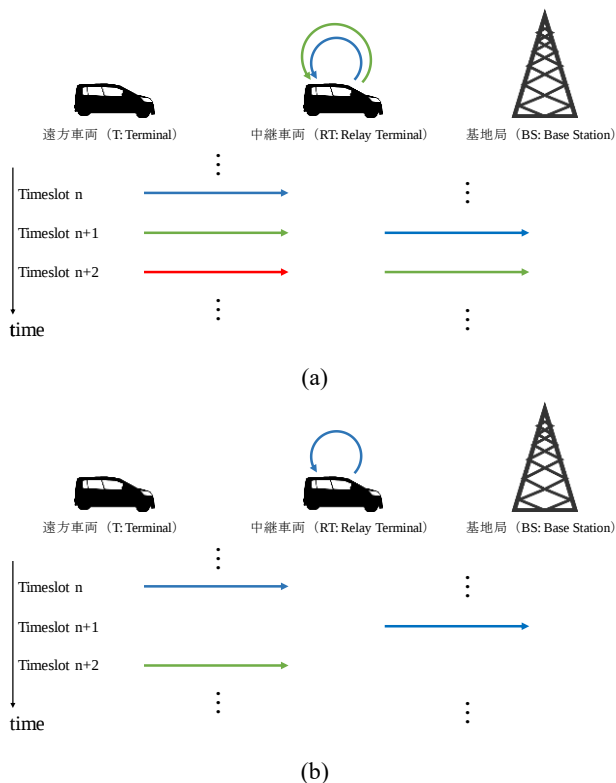


図4 各タイムスロットにおける操作
 (a)全二重協調通信、(b)半二重協調通信

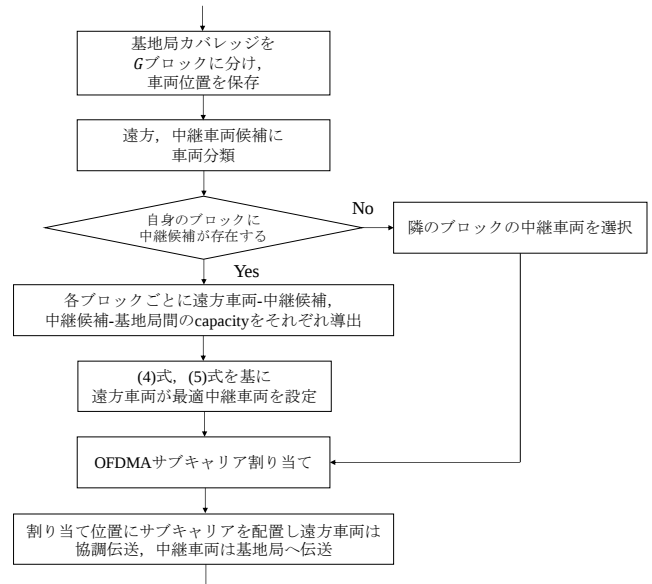


図5 提案システムにおける基地局の中継車両選択アルゴリズム

3.2 中継車両選択機構

協調伝送を行う場合、RT の位置や FT-RT 間のチャネル状態によって協調伝送信号の特性は大きく変化する。そのため適切な RT を選択しペアリングを行うことで、協調伝送品質を向上させることができる。以下に本検討で用いる中継車両選択機構について述べる。図 5 に示す提案システムにおける基地局の中継車両選択アルゴリズムに従って、中継車両の選択を行う。まず基地局のカバレッジを G 個に分け、各ブロック内において車両の位置情報から FT と RT 候補に分類する。自身のブロック内に RT 候補が I 台いる場合、各サブキャリアにおいて FT と i ($i \in [1, I]$) 番目の RT との通信路容量及び i 番目の RT と BS との通信路容量を測定し、それぞれに関して最小値を $C_{FR}(i)$, $C_{RB}(i)$ とする。その後、次式のように $C_{FR}(i)$, $C_{RB}(i)$ を比較し、小さいものを $C_m(i)$ として決定する[9]。

$$C_m(i) = \min\{C_{FR}(i), C_{RB}(i)\} \quad (4)$$

そして $C_m(i)$ に対して(5)式のように $C_m(i)$ を最大にする車両 i' を RT として選択する。

$$i' = \operatorname{argmax}_i [C_{m,i}] \quad (5)$$

また、自身のブロック内に RT 候補がない場合は、隣のブロックの基地局から最も近い車両を RT として選択する。以上のように RT を選択する。

4. シミュレーションシナリオ

本節では郊外環境を模擬するための、simulation of urban mobility (SUMO) を用いた道路ネットワークのシミュレーションシナリオについて述べる。SUMO はドイツ航空宇宙センターが提供しているオープンソースの交通シミュレー

タであり[19], 設定した道路網において車両がどのように走行するかを模擬することができる. 本稿では, SUMO から得られた車両位置データに基づき計算機シミュレーションを行う. 図 6 にシミュレーションフィールドを示す. フィールドは基地局の数が少なく, FT が多数存在する割合が多い郊外を想定した $3,000\text{ m} \times 3,000\text{ m}$ の正方形であり, 青線で区切られた $1,000\text{ m} \times 1,000\text{ m}$ のブロックを九つ配置している. また, 各交差点には信号が設置してあり, 二車線道路である. 車両は信号の加減速を除き 60 km/h で走行し, 交差点のみで進路を変更する. また車両は 0 s から 5 s 間隔でランダムに道路端から発生し道路端で消失するが, 過疎地域を想定しているため車両数はフィールド全体で 20 台に到達すると車両数制限が行われ, 車両数が減少するまで新たな車両が発生しない. 本シミュレーションにおいては $G = 4$ とし, 図 6 において赤線で分けられた 4 ブロックを RT 選択ブロックとする. 各 FT は 3.2 節の中継車両選択機構に基づき RT を選択し協調伝送を行う. ここで基地局は各車両の位置を global navigation satellite system で把握しているものと仮定し, ペアリングを行う. パスロスモデルは郊外での見通し通信路を考慮して RMa-LoS (rural macro-line of sight) とし, フェージングは仰上-ライスフェージング[20]とする.

5. 計算機シミュレーション結果

前節で述べたシミュレーションシナリオに従って提案手法のスループット特性を算出し, 評価を行う. シミュレーション諸元を表 1, フィールド設定を表 2, 回線計算諸元を表 3 に示す. 通信開始時間は 100 s としており, これは車両が十分フィールドに分散したところで通信特性を明らかにするためである. また本シミュレーションにおける 1 s は SUMO システム内の 1 s としており, 毎秒の SUMO の結果を元に基地局がペアリングと周波数割り当てを行い, 伝送特性を算出した.

図 7 に各タイムステップにおける 1 ユーザ当たりのスループットを示す. 図より全タイムステップにおいて半二重協調通信に対して, 全二重協調通信の特性が優れていることがわかる. 全二重協調伝送では半二重協調伝送と比べ, RT が送受信を同時に行うことで, 1 タイムスロット当たりの全体における送信できる情報量が多くなるためである.

また図 8 に各車両位置における全二重と半二重のスループットを示す. 図よりシミュレーションフィールド端における FT のスループットが全二重協調通信により向上していることが確認できる. これは半二重協調伝送では FT において 2 タイムスロットごとに 1 度しか情報が BS に届かないが, 全二重協調伝送では 1 タイムスロットごと情報が BS に届くためである. 以上より, 郊外環境を模擬した大規模シミュレーションを行い, 全二重協調伝送のスループット特性を明らかにした.

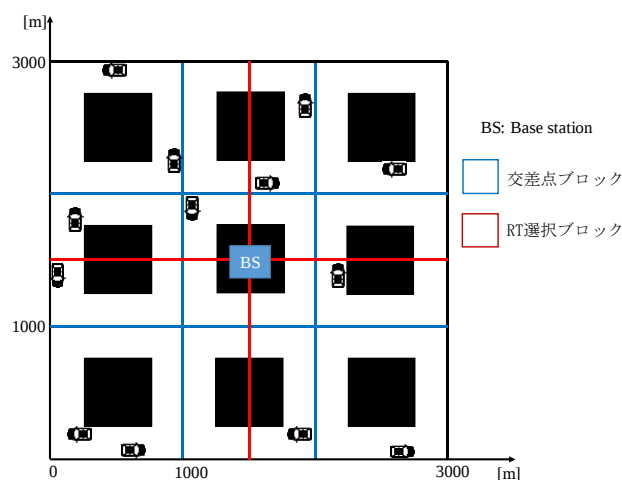


図 6 シミュレーションフィールド

表 1 シミュレーション諸元

Modulation	QPSK
Transmission scheme	OFDMA + cooperative relay
No. of subcarriers N_c	2048
No. of guard intervals	16
Channel	1 dB decaying 8 path quasi-static Nakagami-Rician fading
K -factor	9.85 dB [21]
Channel estimation	Perfect
Equalization weight	Minimum mean square error
Channel coding	Non-systematic convolutional code (code rate 1/2)
Decoding method	Soft Viterbi decoding
Total user	Max 20 (changed in time)
Scheduling algorithm	Proportional fair in equal distribution of subcarrier at per user
Received SNR	Changed at user
Communication time	1000 s
Self-cancellation	110 dB [16]

表 2 フィールド設定

Total timeslots	1000 s
Maximum vehicle numbers in simulation field	20
Vehicle velocity	Constant at 60 km/h
Vehicle appearance frequency	1 unit every 5 s, Max 20 units
Vehicle appearance / disappearance position	Random at road edge
Simulation block size	3000 m $\times$ 3000 m
Vehicle route	random

表 3 回線計算諸元

Link	Unit	T-RT	RT-BS
Transmission system			
Transmission power	dBm	24	24
Transmit antenna gain	dBi	3	3
Power supply loss	dB	1	1
Equivalent isotopically radiated power	dBm	26	26
Propagation system			
Propagation loss model	RMA-LoS [22]		
Rain attenuation	dB	0	0
Reception system			
Receiving antenna gain	dBi	6	14
Received noise figure	dB	4	
Noise power density	dBm/Hz	-169	
Carrier frequency	GHz	4	
Signal bandwidth	MHz	10	

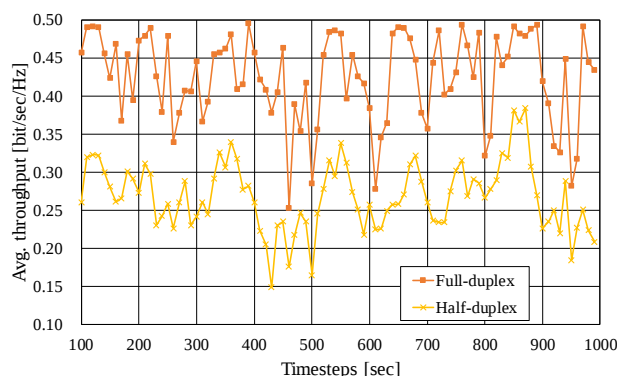


図 7 各タイムステップにおける 1 ユーザ当たりのスループット

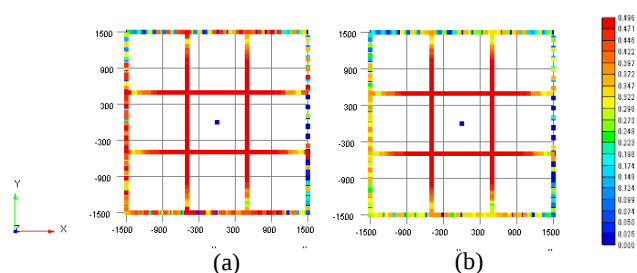


図 8 各車両位置におけるスループット
(a) 全二重協調通信, (b) 半二重協調通信

6. おわりに

本稿では BS が少ないため FT が多数存在する確率が高い郊外環境において、FT の上りリンク協調伝送の性能を改善する手法を提案した。車両選択機構において SUMO から得られた車両位置データに基づく実環境に即したシミュレーションを行った。RT が送受信を同時に行うことで、半二重通信による従来手法と比較して、提案手法である全二重通信を用いた協調伝送システムが各タイムスロットにおいて

スループット特性にて優位性があることを確認した。また、基地局から離れた FT においても半二重通信に対してスループットの向上を行うことが出来た。今後は全二重通信において発生する自己干渉に対して、どれほどの自己干渉除去能力を有していれば全二重通信が半二重通信に対して優れているのかを明らかにし、実環境に近い条件での有効性を示したい。

参考文献

- [1] S. Chen et al., “Vehicle to everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G,” IEEE Commun. Standards Mag., vol. 1, no. 2, pp. 70-76, Jun. 2017.
- [2] S. Chen et al., “LTE-V: A TD-LTE based V2X solution for future vehicular network,” IEEE Internet Things Journal, vol. 3, no. 6, pp. 997-1005, Dec. 2016.
- [3] E. Okamoto, H. Okada, Y. Ishii, and S. Makito, “Low-latency V2I Uplink LDM Transmission Scheme using Superposed Cooperative V2V Transmission,” International conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, p.1, Oct 2017.
- [4] H. Ishikawa, E. Okamoto, S. Okamoto, H. Okada, and S. Makido, “Performance Analysis of Uplink V2I Cooperative Transmission Scheme in Practical Road Environments,” in Proc. International Conference on Information Networking, Kuala Lumpur, Malaysia, Jan. 2019, pp. 98-102.
- [5] 塩満優作, 岡本英二, 三上孝, 吉野仁, “5G URLLC を用いた自動運転を実現する無線フレーム構成の検討,” 信学技報, vol. 119, no. 90, RCS2019-45, pp. 49-54, 2019 年 6 月.
- [6] 長谷川遼, 岡本英二, 秋田英範, “ミリ波帯 V2N 通信におけるアレーアンテナを用いた高精度ビーム追尾方式の検討,” 信学技報, vol. 118, no. 474, RCS2018-302, pp. 113-118, 2019 年 3 月.
- [7] NTT docomo, “次世代モビリティ空間提供の実証実験,” [Online] Available: https://xr.docomo.ne.jp/event_case/case35/.
- [8] 高田潤一, “電波伝搬の基礎理論,” 映像情報メディア学会誌, vol. 70, pp. 142-148, 2016.
- [9] H. Ishikawa, E. Okamoto, H. Okada, and S. Makido, “Performance Improvement of V2I Uplink Transmission on Far Vehicles Using Frequency Scheduling-Based Cooperative V2V Relay Transmission,” Proc. 2020 IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp. 1-6, Jan. 2020.
- [10] B. C. Nguyen, X. N. Tran, T. M. Hoang and L. T. Dung, “Performance Analysis of Full-Duplex Vehicle-to-Vehicle Relay System over Double-Rayleigh Fading Channels,” Mobile Networks and Applications, vol. 25, no. 1, pp. 1-10, Feb. 2020.
- [11] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, “Cooperative Communication in Wireless Networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Oct. 2004.
- [12] K. Eshteiwi, B. Sleim and G. Kaddoum, “Full Duplex of V2V Cooperative Relaying over Cascaded Nakagami-m Fading Channels,” 2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2020, pp. 1-5.
- [13] A. Bazzi, B. M. Masini and A. Zanella, “How many vehicles in the LTE-V2V awareness range with half or full duplex radios?,” 2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), 2017, pp. 1-6.
- [14] 岡本英二, “OFDM と周波数領域等化,” 2009 年電子情報通信学会総合大会, BT-3-1, Mar. 2009. [Online] available: https://okamoto.web.nitech.ac.jp/RCS09G_BT-3-1.pdf.
- [15] H. J. Kushner and P. A. Whiting, “Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 3, no. 4, pp. 1250-1259, July 2004.
- [16] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, “Full duplex radios,”

- Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM'13), pp.375–386, HongKong, China, Aug. 2013.
- [17] J. N. Laneman and G. W. Wornell, “Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, pp.2415-2525, Oct. 2003.
- [18] 猿渡俊介, 渡辺尚, “全二重無線通信の実用化に向けた課題と可能性,” *電子情報通信学会*, vol. 101, no. 4, pp. 387-393, Apr. 2018.
- [19] DLR, “Simulation of Urban Mobility” [Online]
Available:http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/
- [20] 唐沢好男, “無線通信の電波伝搬 ～移動伝搬理解とシミュレーション技法の壺へ,” *Tech. Rep. YK-004*, Nov. 2017. [Online]
Available: http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-004_Propagation.pdf.
- [21] 沖電気工業株式会社, “平成 29 年度「自動走行支援通信のメッセージセット及びプロトコルに関する調査検討」の請負報告書,” [Online]
Available: http://www.sip-adus.go.jp/file/503_s.pdf.
- [22] G. R. MacCartney and T. S. Rappaport, “Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 7, pp. 1663-1677, July 2017.