

ミリ波帯における遮蔽対応型 V2I 通信と解決策について

池 偉奇[†] 中里 仁[†] 村上 友規[‡] 塚田 学[†]

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 〒 152-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

[‡] NTT アクセスサービスシステム研究所 〒 239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: weiqichi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, jin-nakazato@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, tomoki.murakami@ntt.com,
mtsukada@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

あらまし 高度道路交通システム (ITS) において、車車間通信や路車間通信などの V2X は、交通管理、道路安全、緊急対応の解決策を提供する重要な機能である。先進的な ITS アプリケーションにおけるリアルタイムデータ共有の需要増加に伴い、ミリ波通信は高速大容量かつ低遅延通信を実現することが可能な技術とされている。しかし、特に高速や交通量の多い市街地などの道路環境において、ミリ波通信は直進性が強く遮蔽による通信品質の劣化を受けやすいことが課題となっている。本研究では、本課題を解決するために遮蔽予測による協調遮蔽回避システムを提案する。本提案システムは協調走行メッセージ (MCM) を活用し、路側機 (RSU) が将来の遮蔽を予測し、遮蔽を回避するための事前対策を講じることを可能とする。交通状態は、MATLAB と統合した都市交通シミュレーター (SUMO) を用いてモデル化および解析を行う。路車間通信 (V2I) シナリオにおいて、複数の車両タイプを導入してシミュレーションを実施した。さらに、車両による回折の影響がもたらす過剰損失についても評価を行い、システム性能を検証した。本成果について本稿で報告する。

キーワード ITS, ミリ波, V2X, 遮蔽予測, 遮蔽回避, 車両運動協調メッセージ

Blockage-aware Vehicle-to-Infrastructure communication and solutions at Millimeter Wave band

Weiqi CHI[†], Jin NAKAZATO[†], Tomoki MURAKAMI[‡], and Manabu TSUKADA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 152-8657 Japan

[‡] NTT Access Network Service Systems Laboratories
1-1 Hikarinooka, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken 239-0847

E-mail: weiqichi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, jin-nakazato@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, tomoki.murakami@ntt.com,
mtsukada@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Abstract In the Intelligent Transportation System (ITS), vehicle-to-everything (V2X) communication serves as a critical functional enabler, offering solutions for traffic management, road safety, and emergency response. With the increasing demand for real-time data sharing in advanced ITS applications, millimeter-wave (mmWave) communication has emerged as a promising technology capable of delivering high data rates and low-latency communication. However, severe link quality degradation caused by blockages remains a significant challenge in the mmWave band, particularly in high-mobility environments and on roads with heavy traffic volumes. This paper proposes a blockage-aware traffic coordination system. By utilizing Maneuver Coordination Messages (MCMs), the system enables roadside units (RSUs) to predict future blockages and take proactive measures to avoid them. Traffic dynamics are modeled and analyzed using the Simulation of Urban Mobility (SUMO) simulator, integrated with MATLAB. A variety of vehicle types is simulated under a suburban vehicle-to-infrastructure (V2I) communication scenario. Additionally, system performance is evaluated by considering excessive losses due to diffraction effects caused by vehicles.

Key words ITS, millimeter-wave, V2X, Blockage prediction, Pre-blockage Avoidance, Maneuver Coordination Message

1 はじめに

自動運転 (Autonomous Driving: AD) は、高度道路交通システム (Intelligent Transportation System: ITS) の一部であり、交通問題を緩和し、交通安全、燃料消費などの課題に対する解決策を提供するために、様々な研究開発や社会実装において自動運転分野に注目を集めている。LiDAR、レーダー、カメラなどの自動車に設置したセンサーで走路環境を認識する技術 (認知) により、車両は周囲の情報を収集でき、自立運転を実現することができる。さらに、コネクテッド自動運転車 (Connected Autonomous Vehicles: CAV) は、V2X (Vehicle to Everything) 通信を活用して、無線で情報を交換し、協調型システム (Cooperative-ITS: C-ITS) を実現することができる [1]。欧州の標準化団体である ETSI (European Telecommunications Standards Institute) により標準化された協調認識メッセージ (Cooperative Awareness Message: CAM) [2] と集団認知メッセージ (Collective Perception Message: CPM) [3] は、CAV およびその周辺環境に関する動的な情報を提供することができる。CAM には、送信元の ITS ステーション (ITS-S) の状態および属性に関する情報が含まれている。そして、CPM にはセンサーで認識された物標情報を取得することができる。さらに、周辺車両の走行経路推定に基づく協調走行メッセージ (Maneuver Coordination Message: MCM) は現在規格化が進んでいる。これらのメッセージを組み合わせるメッセージセットに利用することで、CAV は自身の運転状態を共有し、他車両を認識することが可能となっている。この情報共有を実現するため、車車間通信 (V2V) および路車間通信 (V2I) を活用することが必要である。

次世代通信技術の標準化団体 3GPP (Third Generation Partnership Project) によると [4]、第 5 世代 (5G) の NR (New Radio) に基づく V2X サービスは、コネクテッド自動運転車のユースケースを対象としている。5G 対応のミリ波 (Millimeter Wave: mmWave) 車両ネットワークは、高データ伝送速度と超低遅延を備えた解決策を提供することを目的としている。複数の ITS-S が協調的認知を行う協調型自動運転では、通信が常時維持されることが重要な前提条件となっている。一方で、ミリ波帯は直進性が強く、遮蔽物による影響を受けるため、通信カバレッジ範囲が狭く、通信接続の安定性が弱いという課題がある。さらに、ミリ波は、ビームフォーミングを導入しており、アンテナ素子を多く搭載することでアンテナ利得を高くしているため、指向性が強く、送信機 (Tx) と受信機 (Rx) の間で見通し環境 (Line-of-Sight: LoS) を維持することが必要であるが、高速に移動が伴う道路環境では LoS を維持することが容易ではない。車両が、高速に移動する道路環境で低遅延通信が可能なミリ波を用いるため V2X 通信の品質の改善は C-ITS の物理層における課題の一つとなっている。

我々のこれまでの研究 [5] をさらに発展させ、本研究では、ミリ波帯 V2I 通信システムにおいて、動的な遮蔽が引き起こす見通し外通信による通信信号品質の不安定化という課題に対処するため、協調遮蔽回避システムのフレームワークを提案する。本フレームワークは、車両の将来経路情報を活用して遮蔽を高

精度に予測するとともに、動的な交通状況において遮蔽を回避可能な先進的協調交通システムの実現を目指すものである。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、路側機を活用した車両ネットワークおよびミリ波遮蔽に関する関連研究を概観する。そして、MCM に関する現状を述べる。第 3 章では、提案するシステムアーキテクチャと手法について詳細に説明する。第 4 章では、シミュレーション結果およびその分析について述べる。最後に、第 5 章では、本研究の結論と今後の課題について議論する。

2 関連研究

本節では、主に以下の 2 つのカテゴリに分けて関連研究を説明する。まず初めに、ミリ波通信の安定性を向上させるための路側機を用いた ITS に関する関連研究を説明する。その次に、MCM に関連する関連研究を説明する。

路側機を利用した ITS は、自動運転技術において運転の安全性を向上させる重要な役割を果たすため、近年注目を集めている。通信リンクも同様に安全性向上のために必要であることから、これらに関連する課題に取り組む研究が数多く行われている。Tunc ら [6] は、見通し環境におけるミリ波 V2I 通信の遅延および信頼性を評価し、遮蔽の確率と遮蔽時間の分布を管理するための 3 つの手法を提案した。しかし、この研究は数値解析に限定されている。Chattopadhyay ら [7] は、複数車線における 60 GHz 帯において LoS を確保するために設置する上で最低限 RSU の高さについて検討を行った。鈴木ら [8] は、複数の RSU およびビームフォーミング技術を用いて通信の信頼性を向上させる方法について分析した。また、飯盛ら [9] は、ランダムな経路においてミリ波通信遮蔽発生する課題に対して、新しいロバストなビームフォーミング手法を提案した。しかし、これらの研究はいずれも将来的な遮蔽リスクを軽減するための検討を実施されていない。

Maneuver Coordination Service (MCS) は、Day3+フレームワークにおいて重要な機能として認識されている。MCM フォーマットは現在標準化の過程にあるものの、交通安全性および効率性の向上を目指したその可能性に関する研究が数多く行われている。MCM を活用したアプリケーションやプロトコルの開発および評価が積極的に行われており、文献 [10] および [11] はその一例を示している。文献 [10] では、自律走行と協調型高度交通システムソフトウェアである Autoware と OpenC2X を統合し、交通量の最適化における MCM の可能性を評価している。一方、文献 [11] では、MCM の運用において意思決定および通信効率の向上を目指したマニューバ優先順位付け手法を提案している。MCS の実装における有益な成果がある一方で、文献 [12] は、MCM による通信チャネル負荷が著しいことを指摘し、その影響を軽減するための効果的な輻輳制御メカニズムの必要性を強調している。著者らの知る限り、MCM を活用した通信リンクの最適化に取り組んだ研究はない。本稿における取り組みは、本分野における MCM 応用の大きな可能性を示唆するものである。

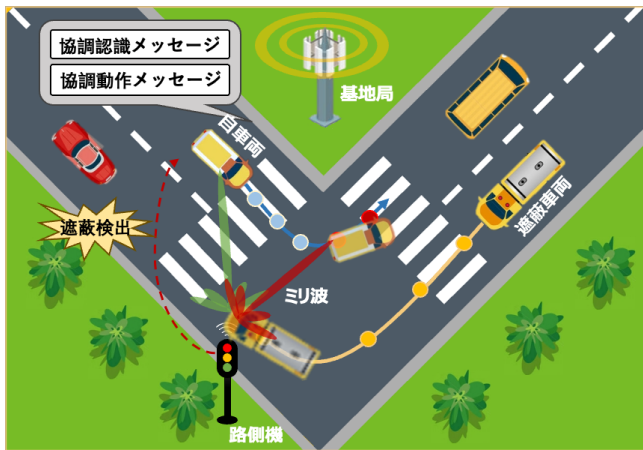


図1: 研究シナリオ：RSU支援による遮蔽回避を伴うミリ波V2I通信

3 システムアーキテクチャ

提案するシステムアーキテクチャを図1に示す。本研究では、路側機が疎に配置された郊外環境を対象とし、普通車やバスなどのさまざまな大きさのCAVが運行しているシナリオを前提とする。CAVは現在位置や車両の寸法といった情報を含むCAMおよび将来の計画走行情報を含むMCMを100ms周期で路側機に対して送信する。路側機はこれらの情報を集約し、受信したCAMおよびMCMを基に現在の交通情報を管理しているデータベースを更新する。このデータベースを活用することで、路側機は自身の通信カバレッジエリア内に存在する全車両に対し、V2I通信を介して将来的に発生し得る遮蔽状況を予測する。遮蔽の発生が予測した場合、路側機は該当する車両に通知し、遮蔽発生予測を警告する。これにより、CAVは遮蔽の影響を軽減するために経路を変更するなどの事前対策を講じることが可能となる。

本提案システムは、V2I通信の安定性を向上させ、遮蔽による影響を最小限に抑えることを目的とする。次節以降で、将来的に発生する遮蔽を予測する手法について説明する。さらに、遮蔽回避のための仕組みについても詳細に説明する。

3.1 将来の遮蔽予測手法

筆者らは、文献[5]において現在の時刻ステップにおけるV2I遮蔽を判定する手法を提案している。本手法は、フレネルゾーン理論および交通と道路側機間の幾何学的関係を活用している。

本研究では、経路基準のMCMを採用しており、路側機はCAVから一連の座標で構成される計画された将来の軌道データを受信する。この軌道データは、車両が現在の位置から目的地に至るまでの詳細な経路情報を含んでおり、受信した軌道データを基に、路側機は将来の軌道データベースを構築する。このデータベースは、各車両の移動経路だけでなく、周囲の環境や他の車両の移動情報を統合する形で設計されている。さらに、路側機は軌道データベースを用いて将来の遮蔽状態を計算する。遮蔽を引き起こす可能性がある障害物（例えば大型車両）を記録し、影響を受ける可能性のある車両に対して遮蔽警告を送信

する。この警告は事前通知として機能し、影響を受ける車両が適切に対応できるようにする。たとえば、車両は通信品質が低下する前に代替経路を選択したり、他の路側機に接続を切り替えたりすることで、通信の安定性を確保する。このプロセスにより、路側機とCAV間の通信が途切れることを防ぎ、車両間およびインフラとの情報共有を継続的に維持できる。そのため、本研究の手法は、MCMを活用した将来予測を通じて、通信遮蔽による潜在的な問題を防ぎ、CAVの通信安定性および走行安全性を向上させることを目的としている。

3.2 V2I通信リンク品質改善手法

本研究では、検出された将来の遮蔽情報に基づき、V2Iリンクの品質を向上させる手法を提案する。ETSI TR 102.863[13]によれば、ローカルダイナミックマップ（Local Dynamic Map: LDM）は、車両周囲の情報を保存しているデータベースであり、CAVの経路選択に有用な情報を提供する。

本研究では、路側機の通信範囲外にある場合、CAVは経路に含まれるエッジに均等な重みを初期設定として割り当て、均一な将来の遮蔽確率を反映していると仮定する。一方、CAVが路側機の通信範囲内に入ると、路側機が将来の遮蔽を検出した際に、タイミングおよび位置情報を含む遮蔽警告を発信する。これにより、CAVはLDM内の特定のエッジの重みを動的に調整し、遮蔽確率の高い位置を含むエッジに対して優先度を低く設定する。この優先度は、潜在的に遮蔽を引き起こす車両の数に比例して減少する。更新された重み分布により、車両は次の時刻ステップで積極的に経路変更を行うことが可能となる。

再経路選択プロセスでは、Dijkstraアルゴリズム[?]を用いて重み付きグラフを処理し、本研究が提案する遮蔽回避手法の基盤を提案する。初期段階では、アルゴリズムはCAVに対して均一なエッジ重みに基づき最適経路を決定する。エッジの重みが増えられた場合、アルゴリズムは安定した通信リンクを優先する形で最適経路を再計算する。この再経路選択プロセスでは、リンク品質と交通効率の間にトレードオフが存在することに留意する必要がある。

3.3 システム評価手法

本章では、提案するシステムについてV2I通信リンクの観点で評価する。本評価では、特に不規則で高い障害物を越える電波伝搬に着目する。郊外における運転シナリオでは、信号伝搬の長距離にわたり、周囲車両による回折および散乱損失が顕著となることが言える。これらの損失を適切にモデル化するため、障害物となる車両をナイフエッジとして表現する手法が一般的に用いられている。本研究では、複数の車両障害物の存在を考慮し、それらを複数ナイフエッジ障害物として記述する。

文献[14]では、エッジ制限のない多重ナイフエッジ回折が導入されている。図2に示すように、V2I通信リンクは路側機と車両の間に確立される。このリンク内の他の車両は、前章で計算された有効高さ制限を超える場合にのみ障害物として認識される。障害車両の両側は、視線（LoS）ライン間のナイフエッジとしてモデル化される。ナイフエッジが合計で n 個存在すると仮定した場合、それらの間の距離は次式で表すことができる。

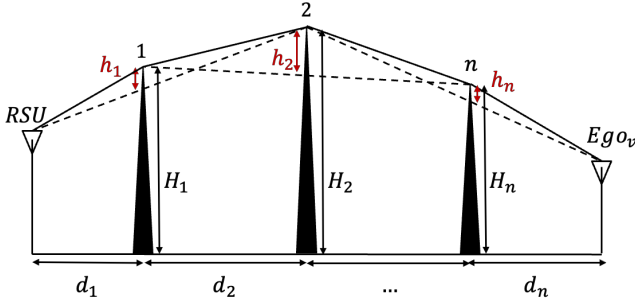


図 2: 多重ナイフエッジ回折

$$d_n = d_{t(n)} - d_{t(n-1)} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

各エッジは通信リンクに対してそれぞれ回折損失を引き起こすため、総回折損失は Epstein-Peterson 法 [15] を用いて計算される。この手法では、総回折損失を一括してモデル化するのではなく、各エッジを仮想的な通信リンクとして個別に扱う。これにより、複数の回折損失を逐次的に評価することが可能となる。図 2 に示す仮想通信リンクは以下のように定義される。

- (1) 仮想リンク No.1: $H_0 \rightarrow H_1 \rightarrow H_2$
- (2) 仮想リンク No.2: $H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow H_3$
- (3) 仮想リンク No.n: $H_{n-1} \rightarrow H_n \rightarrow H_{n+1}$

各仮想リンクについて、回折損失を個別に計算することが可能である。一つの仮想リンクを例として、モデル化プロセスを以下に示す。仮想リンク No.1 を考慮する場合、 H'_1 は H_0 から H_2 までの LoS リンク上で距離 d_1 離れた位置の高さを表す。 H'_1 は、類似三角形の理論を用いることで次のように記述される。

$$H'_1 = \frac{d_1 (H_2 - H_0)}{d_1 + d_2} + H_0 \quad (2)$$

したがって、クリアランス高さ h_1 は次のように表される。

$$h_1 = H_1 - H_0 - \frac{d_1 (H_2 - H_0)}{d_1 + d_2} \quad (3)$$

一般に、仮想リンク No.n に対して次の式が成り立つ。

$$h_n = h_{Epstein(n)} = H_n - H_{n-1} - \frac{d_n (H_{n+1} - H_{n-1})}{d_n + d_{n+1}} \quad (4)$$

仮想リンク n に対するナイフエッジ回折パラメータは次のように与えられる。

$$v_n = h_{Epstein(n)} \sqrt{\frac{2(d_n + d_{n+1})}{\lambda \cdot d_n \cdot d_{n+1}}} \quad (5)$$

ITU-R [16] によると、与えられた v_n に対する回折損失 A_n は dB スケールで以下の式により近似される。

$$A_n = 6.9 + 20 \cdot \left(\sqrt{(v_n - 0.1)^2 + 1} + v_n - 0.1 \right) \quad (6)$$

各ナイフエッジに対する個別の回折効果を計算するため、総回折損失は、個々のエッジによる回折効果を合計した $\sum_{n=1}^N A_n$ で表される。

本研究では、各車両に対する総回折損失を計算し、それを「過剰損失」として計算する。この過剰損失は、提案システムを

表 1: シミュレーションパラメータ

Parameters	Value
車両タイプ	寸法 (m) 確率
	$5 \times 2 \times 0.75$ 20%
	$5 \times 2 \times 1.6$ 60%
	$13 \times 2.6 \times 3$ 20%
中心周波数	28 GHz
シミュレーション間隔	1 s
RSU の高さ	5 m
遮蔽モデル	MKED

評価するための指標の一つであり、提案する遮蔽回避ソリューションの有効性を示すものである。

さらに、交通環境における自由空間伝播損失 (Free Space Path Loss; FSPL) も以下の式を用いて評価する。

$$FSPL = 20 \cdot \log_{10} \frac{4\pi d_{LOS}}{\lambda} \quad (7)$$

この評価を通じて、遮蔽回避手法が通信リンクの品質や通信効率に与える影響を定量的に分析することが可能となる。

4 シミュレーション結果及び検証

本章では、郊外環境における遮蔽回避算法のシミュレーション過程を解説する。具体的には、シナリオ設定、シミュレーションパラメータ、および算法の詳細を述べる。さらに、結果の解析についても検討する。

4.1 シミュレーションの設定

本研究では、SUMO [17] を用いて郊外環境の交通生成および制御を行い、MATLAB と連携させてチャネル特性を算出した。ランダムなネットワーク構造は、SUMO の交通道路生成機能である netgenerate を利用して作成した。3GPP TR37.885 [18] は、新たな車車間通信 (V2X) 用途における交通シミュレーション指標を規定する標準である。この規格に基づきシミュレーション内の車両種類を設定した。具体的には、異なるアンテナ高さを持つ 2 種類の乗用車およびトラック・バス型車両を採用し、車両の発生確率は表 1 に示す。車両は、シミュレーション内でランダムな初期経路を設定されるとともに、ランダムなタイミングで生成、挿入されるように初期化されている。

本稿では、路側機を CAV から送信される必要な交通情報を集約・処理する情報センターとして仮説する。これにより、設計されたシステムは集中型の交通操作系統となり、リアルタイムな情報処理能力と効率的な交通制御を実現する利点を持つ。路側機は必要情報の受信、遮蔽状況の検知、および遮蔽警報の発信といった機能を備えている。これらの機能は抽象化され、MATLAB 上で具現化した。路側機と交通要素間の通信は、SUMO との相互運用を可能にする TraCI4Matlab [19] の API を介して実現した。

遮蔽検出算法および遮蔽回避手法の概要は、図 3 に示すフローチャートで説明する。まず、SUMO を用いて交通を生成し、各模擬時刻ステップごとに車両が最寄りの路側機へ CAM およ

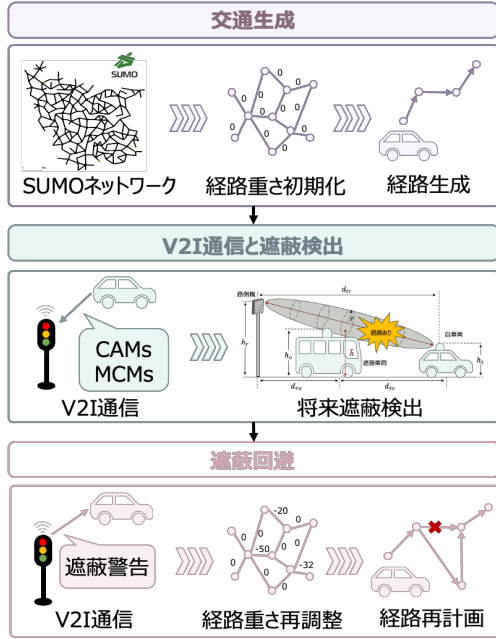


図 3: 遮蔽対応手法

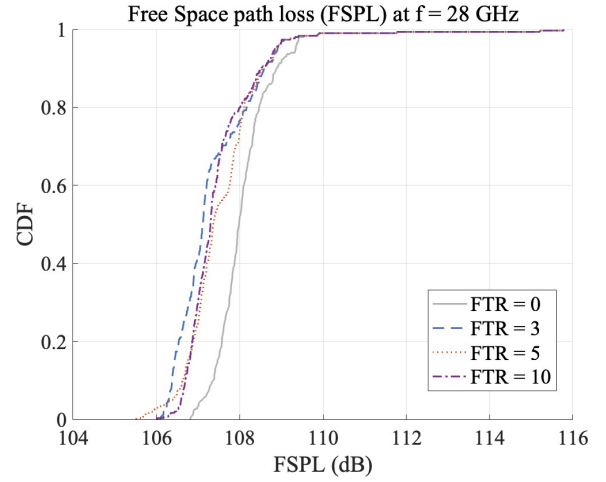
び MCM を送信する。簡略化のため、本模擬では隣接路側機からの干渉がない単一の路側機環境を対象としている。路側機は、共有された将来経路データに基づいて、予測経路の範囲を定義する将来時間範囲 (Future Time Ranges: FTRs) を利用し、潜在的な遮蔽状態を計算する。このプロセスでは、すべての車両について予測される遮蔽状態およびその位置が記録される。遮蔽が検出された場合、路側機は影響を受ける車両に対して警報を発信する。警報を受信した車両は、指定された位置における遮蔽発生確率を反映する形でエッジ重みを更新し、その後、更新されたエッジ重みに基づいて経路を再設定する。

本手法を通じて、各時刻ステップでシステム性能指標が収集され、評価のために使用される。このプロセスは、動的な交通シミュレーションと車両経路再計画の統合的な枠組みを構築するための基盤となる。

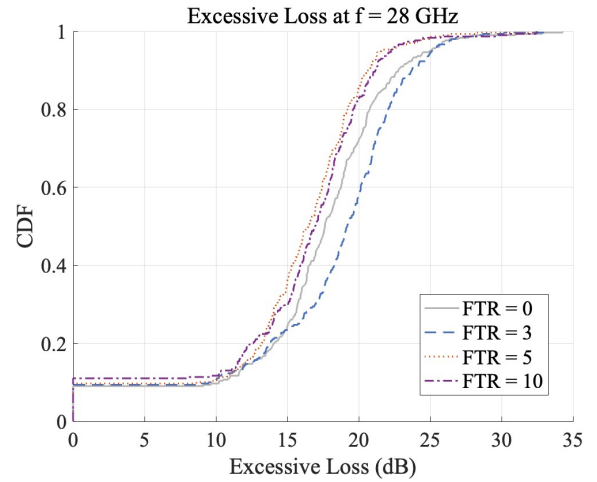
4.2 結果分析

前章で述べたように、システム性能評価のために異なる FTRs を設定した。FTR = 0 は、将来情報が共有されない場面を表し、これは車両が CAM のみを送信する基準ケースに相当する。さらに、車両が MCM を共有する場面を模擬した。この MCM には 3 秒、5 秒、10 秒の範囲で将来経路情報が含まれる。図 4 に示される結果は、模擬各時刻ステップにおける CAV の平均自由空間伝播損失 (FSPL)、過剰損失、および受信総電力の累積分布関数 (CDF) を示している。この図の x 軸はデシベル (dB) 単位で表される評価指標を示し、y 軸は対応する確率を示す。

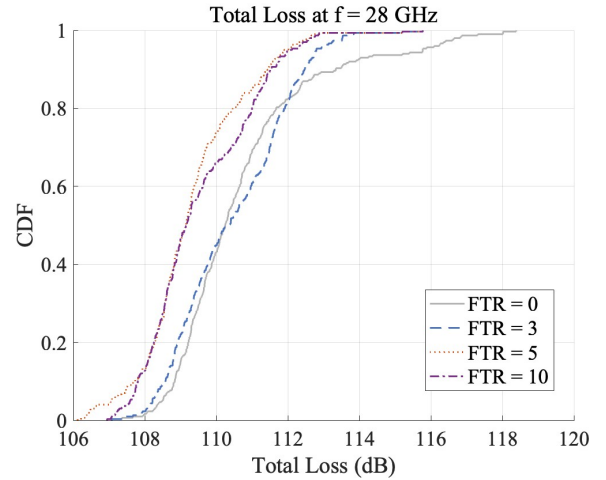
図 4a に示す FSPL について、将来の遮蔽状態を考慮した経路変更により、車両と RSU 間の通信距離が改善されることが確認された。しかし、異なる FTRs 値間での変動は限定的である。この現象は、遮蔽回避算法が CAV のエッジ重みに基づいて経路変更を行う特性に起因する。エッジ重みの計算では通信リンク距離に関連する制約が明示的に考慮されていないため、



(a) 異なる FTR における FSPL の比較



(b) 異なる FTR における過剰損失の比較



(c) 異なる FTR における総損失の比較

図 4: シミュレーション結果

アルゴリズム自体では通信距離の改善が期待できない。さらに、FSPL の評価結果は路側機の配置に依存するため、場面依存性があると言える。このため、FSPL は設計されたシステムの一つの特性として捉えるべきであり、遮蔽回避算法の評価指標として扱うことは適切ではない。

図 4b に示される過剰損失について、結果は $FTR = 5$ の場合に通信リンク品質が最適であることを示している。一方で、 $FTR = 3$ の場合、交通がより頻繁に遮蔽に直面している。このことは、遮蔽率と FTR の関係が厳密に線形ではないことを意味する。この現象はシミュレーションプロセスを通じて説明できる。 FTR s が増加するにつれ、現在の経路に沿った将来の遮蔽を予測する確率が高まる一方で、選択可能な代替経路が減少する可能性がある。経路変更過程が遮蔽率を低減可能な経路を必ずしも保証できない場合、遮蔽率と FTR s の関係は線形性から逸脱する。また、 FTR s が短すぎる場合、経路の急激な変更が発生しやすくなり、短期間に回避困難な新たな遮蔽が生じる可能性がある。したがって、経路変更のみに依存する遮蔽回避手法は不十分であると結論付けられる。 FTR s の設定がリンク品質全体に強い影響を及ぼすため、遮蔽回避手法には多様なアプローチが必要である。

図 4c に示される総信号損失（自由空間伝播損失および過剰損失の両方を含む）について、すべての FTR s 設定において基準ケースと比較してリンク品質が改善していることが確認された。特に、評価したシナリオの中で $FTR = 5$ の構成が最も顕著なリンク品質の向上を示している。これらの結果は、将来の遮蔽状態を基に経路を決定する手法の有効性を裏付けている。しかし、先述のように、経路変更に加えてさらなる遮蔽回避手法を統合することで、システム性能を一層向上させる可能性がある。

5 まとめと今後について

本研究は、ITS における V2I 通信で一般的な課題であるミリ波リンクの遮蔽問題に対処するものである。予測されるリンク遮蔽の影響を事前に軽減するため、新たなアルゴリズムを提案する。さまざまな種類の CAV を含む郊外シナリオで実施した模擬結果により、このアルゴリズムが潜在的な遮蔽を正確に予測し、通信リンク品質を全体的に向上させる有効性を示した。しかし、加速、減速、車線変更といった車両の多様な動作を取り入れることで、さらにリンク品質を改善する可能性も考えられる。

さらに、本研究は、標準化が進行中であるメッセージタイプ MCM の活用に関心を当てている。MCM は、自動運転システムにおける安全性向上および運転体験の最適化を目的として設計された。本研究では、MCM の高度な応用を検討し、ITS における車車間通信の将来発展する可能性について議論を行った。今後の研究では、提案手法の堅牢性をさらに強化するため、複数の遮蔽回避方法の統合について実施する予定である。また、レイトレーシング法を活用した詳細な通信路モデリングは、本稿では議論ができていないため車車間通信における伝搬チャネルの考慮が必要になる。

謝 辞

本研究開発は総務省 FORWARD(受付番号 JPMI240310001) の委託と電気通信普及財団の助成を受けたものである。

文 献

- [1] Y. Asabe *et al.*, “Autowarev2x: Reliable v2x communication and collective perception for autonomous driving,” in *The 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, Florence, Italy, 2023.
- [2] ETSI, “TS 103 900 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture; Basic Set of Applications; Cooperative Awareness Service; Release 2,” 2023.
- [3] ETSI, “TS 103 324 v2.1.1; Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2,” 2023.
- [4] 3GPP, “3rd generation partnership project; study on enhancement of 3gpp support for 5g v2x services (release 16),” 3GPP, Tech. Rep. TR 22.886 V16.2.0, 2018.
- [5] W. Chi, J. Nakazato, T. Murakami, and M. Tsukada, “V2i blockage modeling and performance evaluation for connected autonomous vehicle,” in *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*, 2024, pp. 1–5.
- [6] C. Tunc *et al.*, “The blind side: Latency challenges in millimeter wave networks for connected vehicle applications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 529–542, 2021.
- [7] A. Chattopadhyay *et al.*, “Impact of rsu height on 60 ghz mmwave v2i los communication in multi-lane highways,” in *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, 2021, pp. 1–5.
- [8] 鈴木健吾, 中里仁, 丸田一輝, エ. ジャワーンマーディ, 塚田学, and 江崎浩, “協調型自動運転における複数路側機からの安定したビーミング送信の検討,” in *無線通信システム研究会 (RCS)*, 2024.
- [9] H. Iimori, G. T. F. de Abreu, O. Taghizadeh, R.-A. Stoica, T. Hara, and K. Ishibashi, “Stochastic learning robust beamforming for millimeter-wave systems with path blockage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 1557–1561, 2020.
- [10] M. Mizutani, M. Tsukada, and H. Esaki, “Automcm: Maneuver coordination service with abstracted functions for autonomous driving,” in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021, pp. 1069–1076.
- [11] D. Maksimovski, C. Facchi, and A. Festag, “Priority maneuver (prima) coordination for connected and automated vehicles,” in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021, pp. 1083–1089.
- [12] K. Garlich, A. Willecke, A.-C. Hagau, and L. C. Wolf, “Maneuver coordination for cavs: Its-g5 channel and service performance evaluation,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 7, pp. 6741–6755, 2024.
- [13] ETSI, “ETSI TR 102 863 (V1.1.1) (2011) Intelligent Transport Systems (ITS): Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM) Rationale for and Guidance on Standardization,” 2011.
- [14] W. Samuel, “Computation of 10 knife edge diffraction loss using epstein-peterson method,” *American Journal of Software Engineering and Applications*, vol. 6, p. 1, 02 2017.
- [15] A. F. Molisch, “Diffraction by multiple screens,” in *Wireless Communications*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011, pp. 60–61.
- [16] *Propagation by Diffraction*, 15th ed., International Telecommunication Union (ITU), Geneva, Switzerland, October 2019.
- [17] P. A. Lopez *et al.*, “Microscopic traffic simulation using sumo,” in *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2018.
- [18] “3GPP TR 37.885: Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR, Release 15,” 3GPP, Technical Report TR 37.885, 2018.
- [19] A. F. Acosta *et al.*, “TraCI4matlab: Enabling the Integration of the SUMO Road Traffic Simulator and Matlab® Through a Software Re-engineering Process,” in *Modeling Mobility with Open Data*. Springer, 2015, pp. 155–170.