

NOMA の重畳中継を用いた衝突警告システムにおける インフラレス型セルラ V2X の通信品質向上 NOMA for Infrastructure-less Cellular-V2X in Crash Warning System

平井 健士[†] 村瀬 勉[†]
Takeshi Hirai Tutomu Murase

1. はじめに

ITS (Intelligent Transport Systems)における安全な交通システムの構築のために、V2X (Vehicle-to-Everything)を利用した衝突警告システム (CWS: Crash Warning System) [1]の実現が必須である。CWS では、V2X を利用して、車や歩行者 (以下、ノード)が自分の位置情報等を自律分散的にブロードキャストする。これにより、他のノードの位置を認識し、他のノードと自身の衝突の危険性があれば警告する。本システムは、センサの死角に存在するノードを検知することができるため、より安全な運転が実現できる。

CWSで利用される通信規格として、インフラレス型セルラ V2X (PC5-based Cellular-V2X mode 4、以下 mode 4) [2]が考案されている。この規格では、各ノードが送信履歴情報を保存しておき、その履歴に基づき各スロットの干渉を推察することで、低干渉と推察されるスロットを利用するランダムアクセス方式が採用されている。

CWSでは、衝突可能性のある他ノードの位置を正確かつ遅滞なく把握するために、1秒間に10フレーム以上の頻度で位置情報を受信する必要がある[3]。しかし、ランダムアクセス方式を使うインフラレス型セルラ V2Xでは、V2Xシステムのノード数が増加すると、フレームのコリジョンによるエラーも増加し、受信品質が劣化する[3]。本研究では、この要求を満たすノード数の上限値を収容台数と定義し、収容台数を高めることを目的とし、より幅広いエリアでCWSを稼働させることを目指す。

CWSの収容台数を高めるために、NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) [4] [5]を mode 4 に適用する。NOMAでは、同一時間・同一周波数にて、複数の信号(重畳された信号)を十分な SINR(Signal to Interference Noise Ratio)で受信した場合、それら重畳された複数の信号を同時に受信できるため、帯域利用効率を高めることが期待できる。本研究では、逐次干渉除去技術 (SIC: Successive Interference Cancellation)を利用した NOMA を対象とする。

すでに、既存研究では、基地局が重畳化のための電力制御やスケジューリングを実施する NOMA、ならびに、自律分散的なユニキャストのグラントフリー通信における NOMA が研究されており、その中で、2種類の NOMA が考案されている。1つ目は、複数ノードが電力差を考慮して計画的に同時送信することにより、複数の信号を重畳する NOMA である (以下、複数ノード NOMA)。[4]では、基地局のスケジューリングにより、NOMA を実現している。[5]はグラントフリー通信への NOMA 適用であり、基地局へのユニキャスト通信を自律分散的に重畳している。2つ目は、1台のノードが複数の信号を重畳する NOMA である (以下、1ノード NOMA)。通常は、基地局が複数信号を重畳[4]する。

しかし、mode 4は自律分散かつブロードキャストであるため、既存の複数ノード NOMA・1ノード NOMA 技術をそのまま適用することはできない。まず、ブロードキャスト通信であるため、1回の送信で、全ての受信ノードにおいて十分な SINR が生じるように信号を重畳することは非常に難しい。また、自律分散であるため、基地局に依存せずに、この信号重畳をしなければならない。

そこで、本研究では、自律分散かつブロードキャスト通信に適用できる NOMA として Decentralized Broadcasting-NOMA(DB-NOMA)コンセプトを提案し、mode 4 での収容台数増加を狙う。その例として、2つの手法を考案した。1つ目は、複数ノード NOMA をアレンジした並列転送制御方式である。2つ目は、1ノード NOMA をアレンジした中継転送制御方式である。さらにこの2つの方式を適用したときの収容台数の増加効果を評価する。

2. DB-NOMA コンセプト

2.1 NOMA を利用した並列転送制御方式

本方式では、各ノードが自律分散的に、NOMA に適した送信スロットを推察し、並列にブロードキャストする(図1右)。複数ノードの並列転送により、図1右のように、帯域利用効率を高められるため、収容台数増加が見込める。提案方式を高性能化するために、複数のノードに対して十分な受信電力差が得られるような送信スロットを自律分散的に選択する必要がある。その方針の1つとして、近距離のノードとの同時送信は、その2つの送信信号による SINR があらゆるノードで小さくなるため、避けるべきである。

2.2 NOMA を利用した中継転送制御方式

本方式では、あるノードのブロードキャスト(以下、広告)フレームを受け取った他のノードがそのフレームを中継して送信し、同時に自己の広告フレームをその中継に重畳して送信する(図1左)。本方式によって、追加の帯域を消費せず、特定のノードの受信品質を強化し、ブロードキャスト範囲を拡張できる。この提案方式を高性能化するために、以下の2つを適切に決定する必要がある。

(a) 中継と広告の重畳電力配分: 適切な電力配分を考える上で、2つの条件を考慮すべきである。まず、SICの条件から、図1左に示すように、中継と広告のフレームを十分な電力差をつけて送信する必要がある。また、中継の効果と

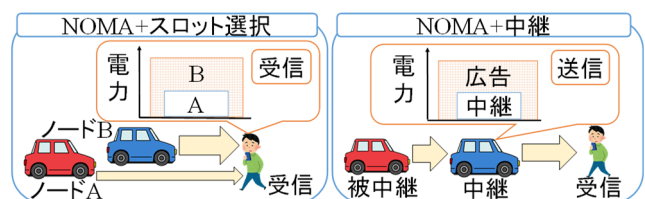


図 1 DB-NOMA コンセプトの例

[†] 名古屋大学 Nagoya University

自身の広告範囲とのトレードオフも考える必要がある。中継に低い電力を割り当てすぎると、中継の効果が小さくなるが、広告の方に高い電力を割り当てすぎると、自身の広告範囲が狭まるため、自身の衝突警告に支障をきたす。

(b) 中継ノード: 冗長な中継は、中継情報の輻輳を招く恐れがあるため、適切な位置のノードのみが中継すべきである。中継ノードが、被中継ノードに近いと、中継時の受信電力増加が小さくなる。一方、被中継ノードから遠いノードが受信できた場合は、中継せずとも、広範囲のノードに十分受信されているため、中継の恩恵が小さくなる。

3. 評価モデル

基礎的な効果調査として、基礎的なモデルを構築して、収容台数を評価する。加えて、中継ノードの広告フレームの受信頻度も評価し、この方式のデメリットも示す。

まず、ノードの配置モデルについて説明する。本評価では、正面衝突シナリオを想定した。正面衝突する 2 台のノードを 100 m 離して配置した。100 m は、相対速度 120 km/h で移動する場合の 3 秒後に衝突する距離である。中心に配置したノードから通信半径 300 m 以内に、他のノードを一樣に分布させた。この分布は、最も基本的な統計分布であり、また、道路上に束縛されない歩行者を模擬していると考えている。また、中継ノードの配置を単純化するため、全てのノードを固定して評価した。

次に評価項目について説明する。正面衝突するノードを評価対象ノードとし、その受信フレーム数を計測し、10 フレーム/s で受信できる上限のノード数である収容台数を評価した。また、中継ノードの受信頻度は、上記の評価対象のノードと比較するために、同様に 100 m 離れたノードに対する受信頻度とした。この中継ノードは、衝突する可能性の低いノードとする。このノードは、受信頻度要求[3]を満たす必要はないが、衝突危険性を探るために適度にフレームを受信する必要があると仮定する。

次に、通信モデルについて説明する。SINR の閾値を利用した受信モデルとし、その閾値を 5 dB とした。また、mode4 は、標準的な設定を使用し[2]、特に、全てのノードの送信電力は固定の 23 dBm [2]とした。要求の 10 フレーム/s を受信するため、多少エラーがあることを想定し、全てのノードは、20 フレーム/s の頻度でフレームを送信した。

最後に、提案方式の評価モデルを説明する。中継を実施する際には、全ての受信フレームで SIC を実施していることになるので、並列転送を単独使用したケースと、2 つの方式を併用したケースを評価した。並列転送方式については、mode 4 のスロット選択機構をそのまま利用した。前述の通り、mode 4 では、送信履歴を利用することで、自身が低い受信電力を感じるスロット、つまり、近距離のノードが送信していないスロットを高確率で選択できる。中継方式は、評価対象のノードに対してのみ導入した。あらゆるフレームを中継すると、自身の広告範囲が狭まるノードが増えるためである。中継は、同一のノードが担当し、その位置は評価対象のノードペアの中心に固定した。中心に配置した理由は、十分な中継効果を得られるためである。ただし、この位置は、最適とは限らない。さらに、同一のノードが中継を実施するため、デメリットが 1 台のノードに集まる。全送信電力に対する中継電力は、1/5 と 1/15 を利用した。これは、SINR 閾値の 5 dB を超える十分な送信電

力差をつけるためである。また、提案手法の実現のために、直交な参照信号を送信する必要があるが、本研究では、mode 4 で送信する参照信号にて代替できると仮定した。

4. 収容台数評価結果

図 2 は、ノード数に対する各手法の受信フレーム数を示している。横軸が通信半径内に存在するノード数であり、縦軸が受信フレーム数である。

全電力に対する中継電力を 1/15 にしたとき、両方式を搭載した提案手法は、その適用前に比べて、69%も収容台数が増加することが明らかになった。NOMA を利用した並列転送機能のみで 13%の収容台数が増加しており、さらに中継機能を入れることで、並列転送のみに対して、収容台数が 50%増加している。このとき、中継ノードは、適用前と比較して受信フレーム数がほぼ低下しなかった。一方で、中継電力を全体の 1/5 にすると、540 台において、被中継ノードは、21%受信フレーム数を高めているが、中継ノードの受信フレーム数は 75%も低下している。よって、提案手法は、適切な電力配分により、デメリットを最小限に抑え、収容台数増加が見込めることが明らかになった。

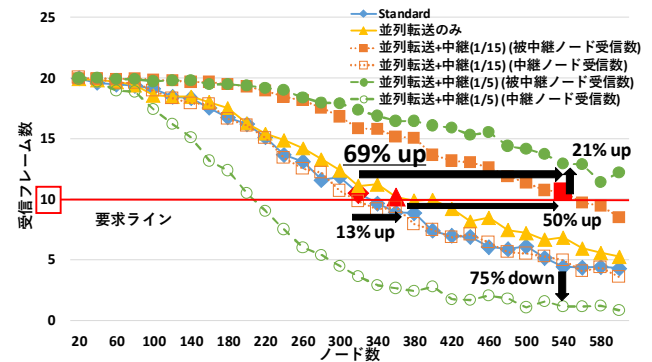


図 2 ノード数に対する受信フレーム数

5. おわりに

本研究では、mode 4 を利用した CWS において収容台数を高めるために、自律分散的なブロードキャスト通信向けの NOMA として、DB-NOMA コンセプトを提案した。その適用例として、NOMA を用いた並列転送方式と NOMA を用いた中継転送方式を提案した。また、評価によって、収容台数が適用前に対して 69%向上することが示された。

謝辞

名古屋工業大学岡本英二准教授には、NOMA 技術についてご教授いただき深謝する。また、本研究の一部は、科研費(19H04093)の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] T. ElBatt et al., "Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications," ACM VANET 2006, 2006.
- [2] A. Bazzi and S. Member, "Study of the Impact of PHY and MAC Parameters in 3GPP C-V2V Mode 4," IEEE Access, vol. 6, pp. 71685–71698, 2018.
- [3] T. Hirai and T. Murase, "Node Clustering Communication Method with Member Data Estimation to Improve QoS of V2X Communications for Driving Assistance With Crash Warning," IEEE Access, vol. 7, pp. 37691 - 37707, 2019.
- [4] C. Chen, B. Wang, and R. Zhang, "Interference Hypergraph-Based Resource Allocation (IHG-RA) for NOMA-Integrated V2X Networks," IEEE IoT Journal, vol. 6, no. 1, pp. 161–170, 2019.
- [5] H. Jiang et al., "Distributed Layered Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access for Massive MTC," IEEE PIMRC 2018, 2018.