

[研究助成 (A)]

車車間・歩車間無線通信における非直交多元接続を可能にする 自己組織型制御の研究開発

Performance Analysis for Self-Organized V2X with Non-Orthogonal Multiple Access

2221023



研究代表者 大阪大学 大学院情報科学研究科 助 教 平 井 健 士

共同研究者 大阪大学 大学院情報科学研究科 教 授 若 宮 直 紀

[研究の目的]

本研究では、非直交多元接続（non-orthogonal multiple access）を組み込んだ車車間・歩車間通信（vehicle-to-everything: V2X）のための自己組織型制御の実現に向けた基礎検討を行なった。

V2X では、各車両・歩行者がユーザとなり、自身の位置情報等を周囲のユーザに伝えるワンホップ V2X と、渋滞情報等を周囲に拡散するマルチホップ V2X の 2 種類のパケット通信が検討されている。このとき、衝突事故警告等の V2X が利用される典型的なシステムを想定すると、各ユーザは、自身から 100 m 離れたユーザに対して、パケット受信率（packet reception ratio: PRR）が 0.9 以上を達成すべきであるという要求がある。

V2X は、低遅延での通信が必要であることから、基地局に頼らない（つまり、自律分散的な）直接通信が求められている。ただし、自律分散性により、無線資源（帯域）へのアクセスが競合してしまい、通信失敗が頻発し、PRR の低下が生じてしまう。つまり、輻輳の問題が発生する。特に、市街地のようなユーザ数が多い環境では、このような帯域のアクセス競合が頻発してしまうため、輻輳問題を緩和する必要がある。

この輻輳問題を緩和するために、NOMA を

用いることが検討されている[1][2]。NOMA では、逐次干渉除去（successive interference cancellation: SIC）を用いることで、複数パケットを受信可能にする。具体的には、複数のパケット信号が混ざった信号の中からあるパケット信号を 1 つ受信できたときに、混ざった信号から受信できた信号を除去する。これにより、残った信号の中からさらなるパケット信号を受信できる可能性がある。このステップを繰り返すことで、複数のパケットを受信できる。ただし、毎回の受信ステップの度に、ある信号の電力に対する干渉とノイズの電力値の合計である信号対干渉ノイズ比（signal-to-interference-and-noise ratio: SINR）が十分に高い必要がある。以下では、ワンホップ V2X に NOMA を組み込んだワンホップ V2X-NOMA とマルチホップ V2X に NOMA を組み込んだマルチホップ V2X-NOMA を考える。

ただし、NOMA による PRR の向上が見込まれる状況を作り出す方法については未だ十分明らかになっていない。具体的には、そもそもの通信方法や、アクセス競合が可能なユーザの位置関係、及び、電力の設定等は十分明らかになっていない。また、ワンホップ V2X-NOMA とマルチホップ V2X-NOMA のそれぞれに対して、適切な通信状況を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、ワンホップ・マルチ

ホップ V2X-NOMA のそれぞれについて、NOMA が効果的に働く通信状況を明らかにする。具体的には、解析とシミュレーションを通して、SIC を使わない直交多元接続 (orthogonal multiple access: OMA) と比較し、PRR の特性を明らかにする。これにより、自己組織化と呼ばれる高度な状況を創発できうる自律分散制御を開発する前段階として、創発させるべき理想の状況を明らかにすることになる。

[研究の内容・成果]

本研究では、ワンホップ通信とマルチホップ通信について、基礎的なアーキテクチャと制御パラメータを検討し、その PRR の解析モデルを構築して、解析・シミュレーションを通して、PRR の特性を示す。

1. ワンホップ V2X-NOMA の解析・シミュレーション

(1) 基礎的なアーキテクチャと特徴

NOMA を用いたワンホップの V2X では、各ユーザが自身のパケットを送信する[3]。結果的に、複数のユーザが同時送信することになると、周囲のユーザは、これらのパケットを同時に受信するために、SIC を用いる。

V2X では、同時送信するユーザと受信ユーザとの位置関係により、受信ユーザが得る SINR の特性が異なる。つまり、これに伴い、PRR の特性も異なる。そこで、ワンホップ V2X-NOMA において、空間に分布している受信ユーザと PRR の関係性を解析する必要がある。具体的には、本研究では、ワンホップ V2X-NOMA の PRR を定式化して、各位置による PRR の特性を空間的に調査する。

また、この SINR が十分に得られない位置に存在する受信ユーザが得る PRR を向上させるために、同一のパケットを複数回送信する連送が考えられる[2]。この手法において NOMA を活かすために、連送を通常の送信より送信電

力を小さく設定する。これにより、通常の送信と同様に、位置関係による SINR の向上に加えて、電力の違いによる SINR の向上も期待できるため、SIC に成功する確率が高められる。ただし、連送については、送信電力を低下させるため、通常の送信よりも通信距離が低減してしまう。そのため、連送に関しては、連送電力の設定と同時送信するユーザの選択が PRR に関わる。これらを解析・シミュレーションにより明らかにする。

(2) PRR の解析・シミュレーション結果

〈連送なしのワンホップ V2X-NOMA の PRR 特性〉

まず、連送のない NOMA を用いたワンホップの V2X について、PRR の特性を解析した。以下の図 1 と図 2 がその結果を示している。ここでは、あるユーザ A が原点に存在し、もう

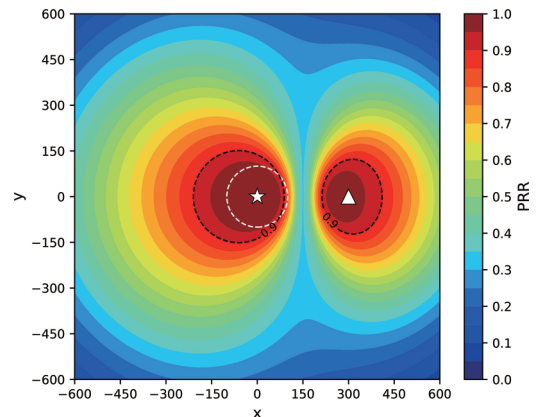


図 1 ワンホップ V2X-NOMA の PRR の空間的特性 ([3] から引用)

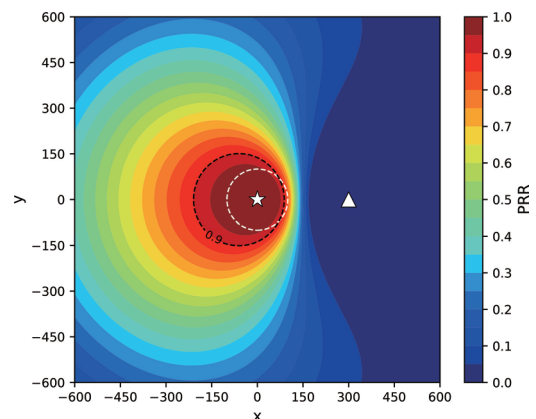


図 2 ワンホップ V2X-OMA の PRR の空間的特性 ([3] から引用)

一方のユーザ B と同時送信する場合に、各座標 (x, y) に存在するユーザが、ユーザ A のパケットについての PRR をカラーマップにより示している。横軸と縦軸は、それぞれ x 座標と y 座標を示している。ここでは、ユーザ A と B 間の距離を 300 m に設定している。また、図 1 と図 2 は、それぞれ、ワンホップ V2X-NOMA とワンホップ V2X-OMA の PRR を示す。

図 1 と図 2 から、V2X-OMA では、同時送信ユーザ付近に存在するユーザほど A のパケットを受信できていなかったのに対して、V2X-NOMA では、ユーザ B の付近ではむしろ A のパケットを受信可能であることが分かった。提案手法により、ユーザ A と B の中間付近の PRR が低下してしまうことが明らかになった。

また、図 3 は、PRR が 0.9 以上の面積を示している。横軸がユーザ A と B の間の距離であり、縦軸が面積である。A と B の間の距離が 300 m 離れたときに、PRR の要求を満たす面積を 55% 増加可能であることが明らかになった。ただし、520 m 以上離れると、V2X-OMA と同様の空間特性を示すことが明らかになった。〈連送ありのワンホップ V2X-NOMA の PRR 特性〉

次に連送ありのワンホップ V2X-NOMA の PRR 特性を示す。図 4 は、連送の電力設定と PRR の関係を示しており、横軸は連送電力比で、縦軸は PRR である。図 5 は最適な連送電力比における連送ありのワンホップ V2X-

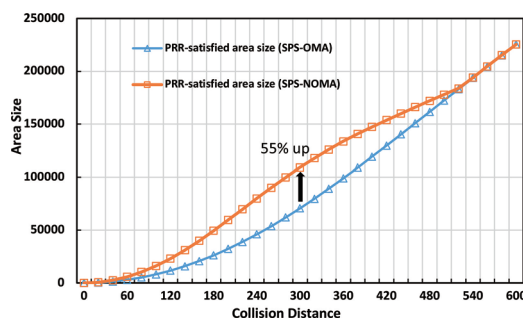


図 3 PRR が 0.9 以上となる空間の面積の特性 ([3] から引用)

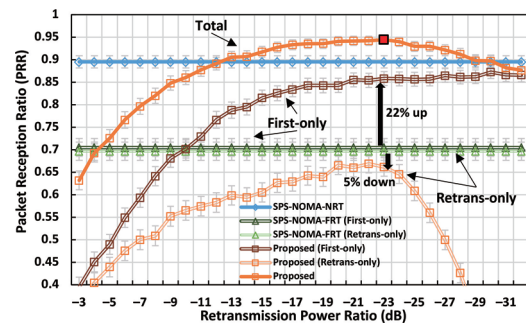


図 4 連送電力比に対する各送信パケットの PRR の特性 ([2] から引用)

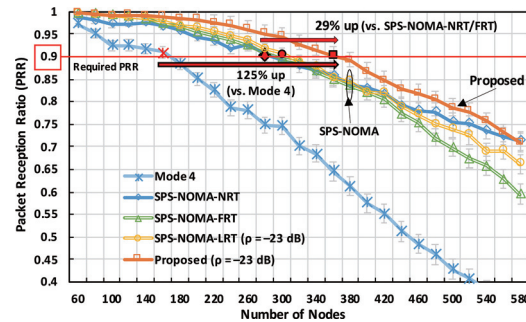


図 5 連送電力比を約 1/200 に設定した連送手法の PRR の特性 ([2] から引用)

NOMA の PRR を示しており、横軸は周囲のユーザ数、縦軸は PRR である。この評価では、周囲に多数のユーザを配置し、それらのユーザが V2X の仕組みで通信している環境をシミュレーションした。これにより、先ほどの評価とは異なり、ユーザ同士の同時送信と、それらの位置関係は確率的に決まることになる。ただし、評価の都合上、連送するユーザは恣意的に決めている。具体的には、本紙には載せていないが、[2] 内の他の評価結果から、近距離のユーザの通常パケットに同期して連送する場合が最も PRR を高められるということを明らかになっている。そのため、各ユーザの近くに配置したユーザと同時送信する状況で評価している。

まず、図 4 では、最適な連送電力比が明らかになっており、連送電力比を -23 dB、つまり、約 1/200 に設定しておく、初送の PRR と連送しない場合の PRR をほぼ同等にしつつ、連送により、初送と連送の合計の PRR を向上可能であることが分かった。また、図 5 では、連送電力比を用いたときの PRR を示している。

PRR が 0.9 以上となるユーザ数が連送のない V2X-NOMA よりも 29% 向上できることが明らかになった。

(3) 自己組織型制御の設計に向けて

これらの研究を通して、ワンホップ V2X-NOMA の自己組織型制御の設計に向けて、連送のために、近距離ユーザとの同期制御を検討していく予定である。類似の自己組織型制御として、ホタルの発光同期等もモデル化できる結合振動子モデルが提案されているため、これらを利用することを予定している。

2. マルチホップ V2X-NOMA の解析・シミュレーション

(1) 基礎的なアーキテクチャと特徴

マルチホップ V2X-NOMA では、各ユーザが自身のパケットを送信することに加えて、マルチホップすべきパケットを 1 つの信号として重畳して送信する。このとき、利用可能な送信電力は上限が決まっており、V2X では、一般的に、ワンホップ V2X に最大電力を使うため、マルチホップすべきパケットを拡散するユーザは、自身のワンホップ V2X のパケットに割り当てる電力の一部をマルチホップのパケットに割り当てることで重畳する必要がある。つまり、 α を重畳電力比とすると、自身のパケットには、 $1-\alpha$ の電力しか割り当てることができない。ただし、各ユーザは自身のパケットを周囲に十分届ける必要があるため、 α は十分小さくしておく必要がある。そのため、自身のパケットの PRR を十分に確保したまま、マルチホップのパケットの PRR をできるだけ高めるような重畳電力比の設定が重要となる。

(2) PRR の解析・シミュレーション結果

ここでは、1 の PRR の解析と同様のユーザ A と B を考え、各座標 (x, y) に存在するユーザにおけるユーザ A からのパケットに関する PRR をカラーマップにより示している。ただし、ユーザ A は、重畳電力比 α によって、自身のパケットとマルチホップすべきパケットを重

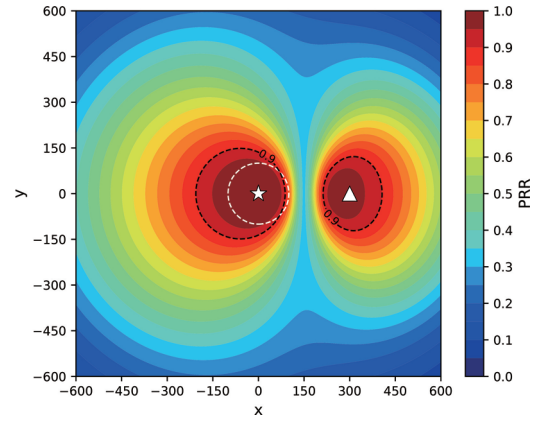


図 6 重畳電力比=1/50 の場合の自身のパケットの PRR の空間特性

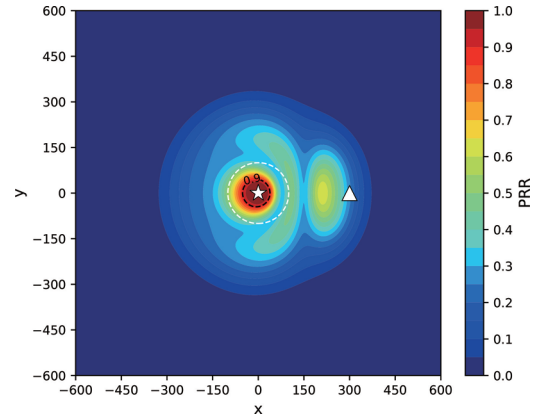


図 7 重畳電力比=1/50 の場合のマルチホップパケットの PRR の空間特性

畳しているとする。本紙では、 α を 1/50 に設定したときの特性を示す。縦軸と横軸は、それぞれ x 座標と y 座標である。ここでも、1 と同様に、ユーザ A と B 間の距離を 300 m に設定している。図 6 は、このときの自身のパケットの PRR の空間特性を示しており、図 7 は、マルチホップさせたパケットの PRR の空間特性を示している。

図 6 と図 7 から、マルチホップ V2X-NOMA の基礎的な空間特性が明らかになった。図 6 から、 α を 1/50 の十分小さな値に設定しておけば、図 1 と遜色ない PRR が達成可能であることが明らかになった。具体的には、PRR が 0.9 以上であることが要求される 100 m 半径の円内に限れば、マルチホップしない場合と比べて、PRR が 0.9 以上となる面積は 0.4% しか

縮小しないことが明らかになった。このとき、 α を $1/5$ にした場合は、7% も縮小していた。また、図 7 から、 α を $1/50$ に設定しても、マルチホップされたパケットを受信可能なユーザは十分期待できることが明らかになった。具体的には、円に換算すると 45 m 半径の円内で 0.9 を超える PRR を達成できることが明らかになった。これらの結果は、今後、学会に投稿予定である。

(3) 自己組織型制御の設計に向けて

本研究を通して、適切な重畳電力比が明らかになった。この重畳電力比に設定することで、1 回の拡散によりパケットを届けられる空間が明らかになった。この研究成果をベースに、マルチホップすべきパケットを拡散するユーザの決定方法を検討する必要がある。ただし、重畳電力比の設定により、マルチホップのパケットを重畳しても自身のパケットは十分広範囲に届けられることが明らかになっているため、マルチホップは積極的に行なっても構わないと予想される。

自己組織化制御の中で、反応閾値モデルと呼ばれる役割分担のモデル等を用いて、このユーザの決定手法を設計可能であると考えている。

本研究成果に基づくと、刺激に対する反応閾値は十分低く設計が可能であると仮定しており、今後、評価等を進めていく予定である。

[参考文献]

- [1] T. Hirai and T. Murase, "Performance Evaluation of NOMA for Sidelink Cellular-V2X Mode 4 in Driver Assistance System with Crash Warning," IEEE Access, vol. 8, pp. 168321-168332, Sep. 2020.
- [2] T. Hirai and T. Murase, "NOMA-aided Probabilistic Cooperative Transmission for PC5-based Cellular V2X Mode 4 for Crash Warning," IEEE Access, vol. 9, pp. 62602-62615, 2021.

[成果の発表・論文など]

- [1] 平井健士, "[依頼講演] インフラレスセルラ V2X のための非直交多元接続," 信学技報, vol. 122, no. 48, IN2022-8, pp. 38-42, 2022 年 5 月.
- [2] T. Hirai, N. Wakamiya, T. Murase "NOMA-dependent Low-Powered Retransmission in Sensing-based SPS for Cellular-V2X Mode 4," IEEE VTC2022-Fall, pp. 1-7, Sep. 2022.
- [3] T. Hirai, T. Kimura, N. Wakamiya, "Spatial Performance Analysis of Autonomous Sidelink Cellular-V2X with NOMA," IEEE GLOBECOM 2022, pp. 1205-1210, Dec. 2022.