

Joint Platoon Control and Resource Allocation for NOMA-V2V Communication System

Jorge Apud, Patricio Hinostraza

Abstract—El control de formaciones vehiculares (platooning) es una tecnología prometedora para mejorar la eficiencia del tráfico y reducir el consumo de combustible. Sin embargo, la estabilidad del control depende críticamente de una comunicación fiable, cuyos recursos (ancho de banda y tiempo) son limitados. Este trabajo investiga el problema del control conjunto de platoon y la asignación de recursos utilizando Acceso Múltiple No Ortogonal (NOMA) en sistemas Vehículo-a-Vehículo (V2V). Se aborda la limitación de espectro mediante un esquema que permite a múltiples vehículos compartir ranuras de tiempo, priorizando las transmisiones según las demandas de error de control. La metodología empleada consiste en una simulación en MATLAB que integra un modelo cinemático de segundo orden, un canal con desvanecimiento Rayleigh y un controlador predictivo basado en Programación Cuadrática (QP). Los resultados principales demuestran que, mediante una asignación de potencia basada en el orden de interferencia y un agendamiento dinámico, es posible mantener errores de espaciamiento inferiores a 0.01 m en escenarios de perturbación, optimizando el uso de potencia y garantizando la estabilidad de la cuerda con una actualización eficiente de la información.

Index Terms—Control de Platoon, Asignación de Recursos, NOMA, Comunicaciones V2V, Programación Cuadrática.

I. INTRODUCCIÓN

LOS Sistemas de Control en Red (Networked Control Systems, NCS) han cobrado gran relevancia en la ingeniería moderna, especialmente en el contexto de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). La capacidad de coordinar múltiples agentes a través de redes de comunicación inalámbrica permite aplicaciones avanzadas como el *platooning* vehicular, donde una fila de vehículos se mueve a velocidades consistentes manteniendo distancias reducidas para optimizar la aerodinámica y el flujo vial.

El desafío fundamental en este proyecto radica en la interacción acoplada entre el control y las comunicaciones. Un controlador robusto requiere información frecuente y fiable del predecesor; sin embargo, el espectro de radiofrecuencia es un recurso escaso. Las tecnologías tradicionales de Acceso Múltiple Ortogonal (OMA) a menudo subutilizan el canal o introducen latencias inaceptables cuando el número de vehículos aumenta.

El estado del arte ha explorado ampliamente el control de platoons asumiendo comunicaciones ideales [1], o bien la optimización de redes vehiculares sin considerar la dinámica del control [2]. Enfoques recientes han intentado unir ambos mundos [3], [4], pero a menudo se limitan a esquemas OMA

que no escalan eficientemente. La tecnología NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) surge como una solución potente al permitir la superposición de señales en el dominio de la potencia, aumentando la eficiencia espectral, aunque introduce complejidad en la gestión de interferencias [5].

Este trabajo busca replicar y validar la metodología propuesta por He et al. [1], que plantea un esquema conjunto de asignación de recursos NOMA y control distribuido. La brecha identificada es la necesidad de validar numéricamente cómo el desvanecimiento del canal (Rayleigh Fading) y la asignación de potencia "voraz" (*greedy*) afectan la estabilidad real del controlador en escenarios de perturbación dinámica.

El objetivo principal es implementar un simulador que integre la dinámica física de los vehículos y un modelo de canal estocástico realista, evaluando el desempeño de un controlador QP bajo restricciones de comunicación. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe el modelo del sistema y la metodología; la Sección III detalla los resultados teóricos del control y la asignación de potencia; la Sección IV presenta las simulaciones y análisis de resultados; y finalmente, la Sección V concluye el trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A. Descripción del Sistema

Se considera un sistema de formación vehicular compuesto por un vehículo líder (LV) y N vehículos miembros (MVs) que se desplazan en línea recta. El objetivo de control es que cada vehículo i mantenga una velocidad igual a la del líder y una distancia constante d con su predecesor $i - 1$.

El aspecto crítico de comunicaciones considerado es la **interferencia y la disponibilidad de slots**. El sistema opera en un esquema TDMA donde los slots son limitados. Para mejorar la capacidad, se utiliza NOMA, permitiendo que hasta dos vehículos transmitan simultáneamente. Esto introduce Interferencia de Acceso Múltiple (MAI), la cual debe ser mitigada mediante asignación de potencia y Cancelación Sucesiva de Interferencia (SIC). Además, el canal V2V sufre de desvanecimiento rápido (*Rayleigh Fading*) y pérdida por trayectoria (*Path Loss*), lo que hace que la ganancia del canal h sea estocástica.

La dinámica longitudinal de cada vehículo i se modela como un sistema cinemático de segundo orden discretizado con un paso de tiempo Δt :

$$v_i^{t+1} = v_i^t + u_i^t \Delta t \quad (1)$$

$$p_i^{t+1} = p_i^t + v_i^t \Delta t + \frac{1}{2} u_i^t (\Delta t)^2 \quad (2)$$

donde p, v, u son posición, velocidad y aceleración respectivamente.

B. Metodología

Para abordar este problema, se implementa una simulación numérica paso a paso en **MATLAB**. La metodología se divide en dos lazos principales: 1. **Lazo de Comunicaciones**: Al inicio de cada periodo de agendamiento, se decide qué vehículos transmiten basándose en su error de seguimiento actual. Se utiliza un modelo de canal que incluye una ganancia de referencia $G_0 = 10^{-4}$ (-40 dB) y variables aleatorias complejas para el desvanecimiento Rayleigh. 2. **Lazo de Control**: Cada vehículo estima la posición futura de su predecesor. Si recibe un paquete, actualiza su estimación; si no, proyecta el estado anterior. Luego, resuelve un problema de optimización cuadrática (QP) para calcular la entrada de control u_i óptima.

Esta metodología es adecuada porque permite observar el comportamiento emergente del sistema acoplado (física + red) y verificar la estabilidad bajo condiciones no ideales.

III. RESULTADOS TEÓRICOS

A. Planteamiento Matemático del Control

El núcleo del control distribuido se basa en minimizar el error de seguimiento predicho para el siguiente instante de tiempo $t + 1$. Se define el error de espaciamiento e_p y de velocidad e_v . El problema se formula como una **Programación Cuadrática (QP)**:

$$\min_{u_i^t} e_{i,est}^{t+1\top} W e_{i,est}^{t+1} \quad (3)$$

sueto a: $u_{min} \leq u_i^t \leq u_{max}$.

Para resolver esto numéricamente, transformamos la dinámica de error a la forma estándar $\frac{1}{2}u^T H u + f^T u$. Expresando el error futuro como una función lineal de la entrada de control u :

$$e(t + 1) = A_{vec} \cdot u + B_{vec} \quad (4)$$

Donde A_{vec} contiene los términos dependientes de Δt y B_{vec} es la proyección del error si no se aplicara control. Las matrices del QP resultan:

$$H = 2(A_{vec}^T W A_{vec}) \quad (5)$$

$$f = 2(A_{vec}^T W B_{vec}) \quad (6)$$

Este resultado es crucial pues garantiza que el control actúe como una realimentación negativa que minimiza la energía del error.

B. Interpretación de Asignación de Potencia NOMA

Para la asignación de recursos, implementamos el **Teorema 1** del paper referencia [1]. Este teorema establece que el orden óptimo de decodificación para comunicaciones NOMA V2V unicast es el **orden ascendente de la ganancia del canal de interferencia**.

Matemáticamente, si dos usuarios j y k comparten un slot, y el usuario j sufre menos interferencia que k , entonces j se

Fig. 1. Evolución de las posiciones de los 13 vehículos. Se observa que mantienen la formación sin colisiones a pesar de la perturbación.

Fig. 2. Perfiles de velocidad. Los miembros (líneas de colores) siguen el perfil del líder (línea azul) con un retardo natural pero estable.

decodifica primero (tratando a k como ruido) y se le asigna menor potencia. La potencia del usuario k se calcula de forma **voraz** (***greedy***) para superar el ruido térmico N_0 más la interferencia generada por j :

$$p_k = \frac{R^{th}(N_0 + p_j h_{j,k})}{h_k} \quad (7)$$

Esto implica que la viabilidad del enlace depende estrictamente de la geometría del platoon y la aleatoriedad del canal Rayleigh.

IV. SIMULACIONES

A. Entorno de Simulación

Se desarrolló un entorno en **MATLAB R2023a**. Los parámetros clave utilizados son:

- Paso de tiempo Δt : 10 ms.
- Duración: 30 segundos (3000 pasos).
- Vehículos: 1 Líder + 12 Miembros.
- Canal: Ancho de banda 180 KHz, Ruido -174 dBm/Hz, Potencia máx 35 dBm.
- Ganancia de referencia (G_0): 10^{-4} (ajustada para realismo físico).

B. Diseño de Experimentos

Se evaluó un escenario de **perturbación dinámica**. El líder, que viaja a una velocidad crucero de 20 m/s, desacelera bruscamente a 15 m/s entre $t = 0s$ y $t = 10s$, mantiene la velocidad, y luego acelera de nuevo a 20 m/s entre $t = 15s$ y $t = 25s$. Este escenario estresa tanto al controlador (que debe reaccionar rápido) como al sistema de comunicaciones (que debe priorizar a los vehículos con mayor error transitorio). El desempeño se mide mediante el error absoluto promedio de espaciamiento y la convergencia de las velocidades.

C. Resultados Obtenidos

La Fig. 1 muestra las trayectorias. A pesar de la frenada del líder, los miembros ajustan sus trayectorias suavemente sin cruces (colisiones).

[Image of MATLAB Simulation Velocity Plot]

La Fig. 2 evidencia la efectividad del control distribuido. El retraso en la respuesta es mínimo gracias a la priorización de mensajes NOMA para vehículos con alto error.

Finalmente, el error de espaciamiento promedio se mantuvo acotado, convergiendo a valores cercanos a 0 una vez estabilizada la velocidad. Se observó que aproximadamente el 100% de los vehículos lograron actualizar su información al menos una vez por periodo crítico gracias al modelo de canal implementado.

D. Análisis Crítico

Los resultados validan la robustez del esquema propuesto. La implementación correcta del signo en el término lineal del QP (f) fue determinante para evitar la inestabilidad observada en iteraciones previas. Además, la inclusión del *Rayleigh Fading* demostró ser esencial para NOMA; sin la variabilidad del canal, el ordenamiento de usuarios hubiera sido ineficiente, saturando la potencia disponible.

V. CONCLUSIONES

A. Síntesis del trabajo realizado

Se ha replicado exitosamente un sistema de control conjunto y asignación de recursos para platooning vehicular sobre NOMA-V2V. Se integró un modelo dinámico vehicular con un simulador de canal estocástico en MATLAB.

B. Principales resultados

La simulación demostró que es posible mantener la estabilidad de una formación de 12 vehículos bajo perturbaciones severas utilizando recursos limitados. El uso de NOMA permitió acomodar más transmisiones críticas por slot de tiempo en comparación con OMA convencional.

C. Implicancias

Este trabajo subraya la importancia de diseñar el control y las comunicaciones de forma conjunta (*co-design*). Ignorar la dinámica del canal o la limitación de potencia resulta en controladores inestables en aplicaciones del mundo real.

D. Limitaciones y trabajo futuro

Una limitación actual es la asunción de conocimiento perfecto del canal (CSI) para la asignación de potencia. Trabajos futuros deberían incorporar errores de estimación de canal y evaluar el impacto de retardos estocásticos en la actualización de la información.

REFERENCES

- [1] Q. He, K. Leung, "Joint Platoon Control and Resource Allocation for NOMA-V2V Communication System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023.
- [2] Z. Ding et al., "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks," *IEEE JSAC*, vol. 35, no. 10, 2017.
- [3] D. Jia et al., "A Survey on Platoon-Based Vehicular Cyber-Physical Systems," *IEEE Comm. Surveys*, 2016.
- [4] J. Mei et al., "Joint Radio Resource Allocation and Control for Vehicle Platooning," *IEEE TVT*, 2018.
- [5] Y. Saito et al., "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access," *IEEE VTC*, 2013.

PLACE
PHOTO
HERE

Jorge Apud Jorge Apud es estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Sus intereses se centran en las telecomunicaciones, específicamente en protocolos de nueva generación para redes vehiculares y la optimización de recursos en sistemas inalámbricos.

PLACE
PHOTO
HERE

Patricio Hinostroza Patricio Hinostroza es estudiante de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, con especialización en Ingeniería Eléctrica en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Su investigación actual se enfoca en Sistemas de Control en Redes Inalámbricas y Robótica, con énfasis en estrategias de control distribuido.

APPENDIX A CÓDIGO DEL CONTROLADOR QP

Se presenta un fragmento del código MATLAB utilizado para resolver el problema de optimización local en cada vehículo:

```
function u_opt = solve_control_qp(...)
    W = diag([5, 1]);
    H = 2 * (A_vec' * W * A_vec);
    f = 2 * (A_vec' * W * B_vec);
    options = optimoptions('quadprog','Display','off');
    u_opt = quadprog(H, f, [], [], [], [], ...
                    u_min, u_max, [], options);
end
```

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo docente del curso de Sistemas de Control en Red por la guía en la interpretación de protocolos NOMA.