

Enrutamiento eficiente de tokens en mercados descentralizados basados en Blockchain

José Miguel Quílez Vergara, David Morilla Cabello, Eduardo Montijano Muñoz

Afiliación: Grupo de Robótica, Visión por Computador e Inteligencia Artificial (RoPeRT)

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

Tel. +34-637603445, e-mail: 873499@unizar.es

Resumen

Este trabajo presenta una arquitectura integral de enrutamiento y arbitraje de *tokens* para la blockchain de [Solana](#). Incluye un novedoso sistema de captura de estado del mercado mediante variaciones en eventos y un algoritmo de búsqueda adaptado para resolver el problema computacional en entornos de latencia extremadamente baja.

Introducción

El ecosistema financiero descentralizado sobre la blockchain de Solana maneja un volumen aproximado de 77 mil millones de dólares semanales. En este entorno, los intercambios de activos (*tokens*) se realizan a través de *pools* de liquidez gestionadas por creadores de mercado automatizados (AMMs). Aprovechando esta infraestructura, el arbitraje atómico consiste en la ejecución algorítmica de ciclos cerrados de intercambio que explotan ineficiencias temporales de precios entre múltiples *pools* para generar un beneficio neto, todo ello en una única transacción. Dada la elevada velocidad de la red, con tiempos de bloque cercanos a los 400 milisegundos, calcular la ruta óptima de intercambio y detectar estas oportunidades resulta crítico; una mínima desviación subóptima genera un coste de oportunidad que se traduce en pérdidas millonarias a nivel global. Este trabajo aborda el desafío de construir un sistema de enrutamiento y captura de estado capaz de operar bajo estas extremas restricciones de latencia.

Modelado y metodología

El ecosistema se modela como un grafo dirigido $G=(V,E)$, donde los vértices, V , representan *tokens* y las aristas, E , representan *pools* de liquidez. A diferencia de los grafos clásicos, el "coste" de cruzar una arista no es estático ni aditivo. Cada arista tiene un peso operacional dinámico y altamente no lineal, determinado por una función de cotización que

depende de la cantidad de entrada y del vector de estado interno de la *pool*.

El problema de enrutamiento óptimo consiste en maximizar la cantidad de beneficio final obtenida a través de la composición de estas funciones a lo largo de un camino acotado de longitud arbitraria. Este problema carece de subestructura óptima, ya que el subcamino de una ruta óptima no es necesariamente la ruta óptima entre esos nodos intermedios.

Por otro lado, al enfocar el problema del arbitraje (es decir, un enrutamiento cíclico), se precisa parametrizar una serie de variables de decisión para maximizar la rentabilidad de las rutas a explotar. Estas variables son el token de inicio / destino, el capital inicial y el límite de intercambios / profundidad para el algoritmo de búsqueda de rutas y la cantidad de tokens de inicio para la maximización del beneficio de la ruta (tras haberla encontrado).

Desarrollo e implementación

Para resolver este problema, se ha diseñado una arquitectura dividida en dos subsistemas principales:

1) Generación y almacenamiento eficiente del estado del mercado: La captura de estados completos del mercado cada 400 ms requiere un volumen inasumible de datos (90 MB por minuto). Para solucionarlo, se ha desarrollado un sistema asíncrono orientado a eventos que calcula *deltas* (diferenciales de bytes) cada vez que una cuenta muta. Esto ha reducido el tamaño de almacenamiento a una media de 10 KB por captura (un 98,3% de compresión), permitiendo reconstruir el estado financiero en cualquier instante del pasado con resolución sub-milisegundo.

2) Ganimedes (Motor de Enrutamiento): Es un enrutador ligero que mantiene una topología en memoria con estados mutables en tiempo real. Dado

que algoritmos óptimos clásicos como Bellman-Ford no son aplicables por la falta de subestructura óptima y los altos tiempos de ejecución [1], se ha implementado una heurística voraz basada en una adaptación del algoritmo SPFA (*Shortest Path Faster Algorithm*). Aunque este enfoque es subóptimo, garantiza tiempos de respuesta en el orden de los milisegundos, viabilizando el envío de transacciones antes del cierre del bloque.

Experimentos y resultados obtenidos

La validación experimental de la arquitectura se ha utilizado para esclarecer las incógnitas sobre las variables de decisión y evaluar el sistema en un entorno de ejecución real, demostrando la dualidad entre el funcionamiento teórico y práctico.

Rendimiento algorítmico de enrutamiento: La evaluación de heurísticas demuestra que, mientras que la búsqueda exhaustiva (óptima global) resulta inviable en tiempo real por su complejidad exponencial $O(2^d)$, la adaptación voraz del SPFA es capaz de computar rutas subóptimas en escasos milisegundos.

Parametrización empírica de las variables de decisión: A partir de los experimentos realizados, se han calibrado los valores óptimos para el sistema. Los resultados demuestran que, estadísticamente, *Wrapped Solana* (WSOL) se posiciona como el activo base más rentable para los ciclos de arbitraje. Asimismo, el beneficio neto se maximiza operando con un capital inicial aproximado de 0,80 €, limitando la exploración del algoritmo a una profundidad máxima de 4 saltos para acotar la complejidad computacional y garantizar una ejecución de baja latencia.

Validación en producción (Teoría vs Práctica): A pesar de la extrema eficiencia en la *pipeline* de cálculo de rutas, generación y envío de transacciones, la ejecución real de dichas transacciones en *mainnet* presenta una alta tasa de transacciones fallidas [2]. Como se observa en la Figura 1, existe una correlación directa entre la rentabilidad de la oportunidad y la congestión de red. Los actores institucionales y *bots* de MEV

(*Maximal Extractable Value*) saturan los validadores de Solana, dificultando enormemente la ejecución exitosa o *landing* de nuestras transacciones.

Conclusiones

El modelado paramétrico del mercado y la arquitectura asíncrona desarrollada resuelven con éxito el desafío del cómputo de rutas de alta frecuencia. No obstante, los resultados empíricos concluyen que, en el actual ecosistema descentralizado de Solana, la eficiencia algorítmica y temporal del *software* de enrutamiento no es suficiente para garantizar la rentabilidad del arbitraje, debido a las asimetrías de infraestructura y la congestión adversarial de la red en todo lo referente a la ejecución de las transacciones que explotan estas oportunidades.

REFERENCIAS

- [1]. ZHANG, Y., YAN, T., LIN, J., KRANER, B., and TESSONE, C.J. An improved algorithm to identify more arbitrage opportunities on decentralized exchanges. In *2024 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)*. Dublin: IEEE, 2024, pp. 1-7. Available from: doi: 10.1109/ICBC59979.2024.10634351.
- [2]. ZHENG, X., WAN, Z., LO, D., XIE, D., and YANG, X. Why does my transaction fail? A first look at failed transactions on the Solana blockchain. *Proceedings of the ACM on Software Engineering*. 2025, 2(ISSTA), 1489-1512. Available from: doi: 10.1145/3728943.

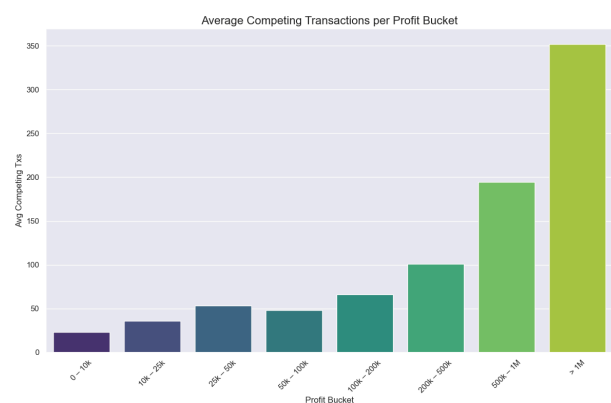


Figura 1. Número medio de transacciones competidoras por oportunidad de arbitraje en función del beneficio máximo extraíble (en lamports).