

## ПАКЕТНЫЕ АУКЦИОНЫ

**Вахранев А.В.**

ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия

anton22255@yandex.ru

*Аннотация. Статья продолжает работу по исследованию задачи распределения ресурсов в сетевой модели. Предложенный подход с применением аукционов требует методологии постановки задачи и её реализация в сетевых моделях. Работа описывает пакетный аукцион, формулирует задачу аукциониста, предлагает схему реализации контракта в блокчейн сети.*

*Ключевые слова: пакетный аукцион, блокчейн, участник, аукционист, смарт-контракт.*

### Введение

Решение задачи распределения ресурсов в сложной системе может быть очень громоздким. В случае работы с сотнями и тысячами наименований требуется постоянный мониторинг ресурсов участников в постоянно изменяющихся условиях рыночной конкурентной среды. Для достаточно большой системы централизованный подход может быть менее эффективен, чем децентрализованный. Поэтому в работе [1] был описан способ декомпозиции задачи, в котором передается большая часть функций по оценке производственных мощностей предприятий и разработке общего плана производства самим предприятиям. В данном случае аукционная схема это такой способ декомпозиции общей задачи. Для неё должны выполняться те же балансовые и ресурсные ограничения, и ещё некоторые дополнительные, обусловленные декомпозицией. Продолжая работу [2], следует рассмотреть формальную модель аукциона, задачу аукциониста и описание работы аукциона в сетевой модели.

Приступая к данной работе, следует выбрать тип аукциона, описание которого ляжет в основу постановки задачи. Следуя за последними работами в теории аукционов, стоит рассмотреть пакетные аукционы (Batch Auction), которые получили широкую популярность как в реальных секторах экономики (продажа ресурсов, частот радиовещания и связи), так и в виртуальном пространстве (продажа NFT-токенов). Более того, возможно сведение пакетного аукциона к одной из классических форм, когда участники пытаются приобрести лот в единственном экземпляре.

### 1. Пакетный аукцион

Пакетный аукцион — это форма аукциона, при которой участники могут делать ставки на несколько лотов одновременно. В отличие от традиционного аукциона, где участники делают ставки на каждый лот отдельно, в пакетном аукционе они могут предлагать цены за группу лотов.

Исследования, связанные с пакетными аукционами и блокчейн технологией, показывают потенциал использования блокчейна для улучшения эффективности и прозрачности процесса аукционов.

Работа [3] исследовала применение блокчейна в пакетных аукционах для продажи разрешений на использование радиоспектра. Исследователи обнаружили, что блокчейн может значительно улучшить эффективность и прозрачность процесса аукционов, снизить возможность манипуляций и обеспечить надежность данных.

Другое исследование [4], описывает применение блокчейна в пакетных аукционах для распределения ресурсов в сети Интернет вещей (IoT). Исследователи пришли к выводу, что блокчейн может улучшить прозрачность и безопасность процесса аукционов, а также обеспечить надежность и справедливость в распределении ресурсов.

Также были проведены исследования [5-10], связанные с использованием умных контрактов на блокчейне для автоматизации процесса пакетных аукционов. Умные контракты позволяют участникам аукциона сделать ставки и определить победителя без необходимости вмешательства третьей стороны. Это упрощает и ускоряет процесс аукциона, делая его более эффективным.

Исследования также обращают внимание на проблемы, связанные с масштабируемостью и конфиденциальностью блокчейна в контексте пакетных аукционов. Исследователи предлагают решения, такие как использование смешанной модели блокчейна, которые комбинируют публичную и приватную блокчейн сети, чтобы обеспечить баланс между прозрачностью и конфиденциальностью.

В целом, предыдущие исследования подтверждают потенциал блокчейна для улучшения пакетных аукционов. Однако, дальнейшие исследования требуются для более глубокого понимания технических и экономических аспектов применения блокчейна в этой области.

Основные характеристики пакетного аукциона включают:

- Группировка лотов: Лоты объединяются в группы, которые продаются как единое целое. Это позволяет участникам делать ставки на несколько лотов одновременно и учитывать комбинированные эффекты.
- Множественные ставки: Участники могут делать несколько ставок на разные группы лотов. Это позволяет им выразить свои предпочтения и стратегии при покупке нескольких лотов.
- Комбинированные эффекты: Пакетный аукцион учитывает комбинированные эффекты, которые могут возникнуть при покупке нескольких лотов. Например, участник может быть готов заплатить больше за группу лотов, чем за каждый лот по отдельности, из-за синергии или комплементарности между лотами.
- Определение победителя: Победитель пакетного аукциона определяется на основе комбинации ставок и предпочтений участников. Обычно используются различные алгоритмы определения победителя, такие как алгоритмы оптимальной комбинации или алгоритмы с высокой ценой.
- Прозрачность и эффективность: Пакетные аукционы обеспечивают прозрачность процесса, так как все ставки и результаты являются общедоступными. Это помогает предотвратить манипуляции и создает более эффективный рынок.
- Применение в разных отраслях: Пакетные аукционы широко используются в различных отраслях, таких как телекоммуникации (например, продажа радиоспектра), энергетика (например, продажа прав на добычу нефти и газа) и финансовые рынки (например, продажа ценных бумаг).

В целом, пакетные аукционы представляют собой эффективный и прозрачный механизм продажи группы лотов, который позволяет участникам выразить свои предпочтения и стратегии. Использование блокчейна в пакетных аукционах может улучшить их эффективность, прозрачность и безопасность.

## 2. Модель пакетного аукциона

Опишем формальную модель аукциона. Предположим, имеется группа агентов  $A = (A_s, A_1, \dots, A_m)$ , где  $A_s$  – агент продавец, размещающий на торги некоторый актив  $a_s$  и агент покупатель  $A_l, l \in [1, \dots, m]$ , который участвует в аукционе по приобретению некоторой части актива. Актив  $a_s$  разбивается на  $r$  составных частей и представляется в виде  $a_s = \sum_{j=1}^r k_j s_j$ , где  $k_j$  количество частей  $s_j$ . Тогда аукцион  $S$  определим следующим образом:

$$S = \langle C_0, Of_j^{li}, C_p, C_f, W \rangle, \quad (1)$$

где

- $C_0 = \langle c_j^0 \rangle$  – вектор начальных цен на составные части актива  $a_s$  ( $c_j^0$  начальная цена на  $s_j$ );
- $Of_i^{lj}$  – матрица предложений,  $Of_j^{li} \in R^{(m \times r \times t \times 2)}$  формируется из предложений агентов  $l = \{1, \dots, m\}$ , которые делают ставки на каждом раунде  $i = \{1, \dots, t\}$  в формате  $b_{il}^j = \langle q_j, p_j \rangle \in R^{r \times 2}$ ,  $l$  – участник на раунде  $i$  предложил цену  $p_j$  за количество  $q_j$  частей  $s_j$ ;
- $C_p$  – условие останова аукциона;
- $W$  – правило отбора финальных предложений участников  $\hat{b}_{il}^j$ ;
- $C_f$  – финальные цены для части актива  $a_s$ ,  $C_f = \langle \hat{b}_{il}^j \rangle$  – предложения участников, которые выбираются в качестве финального результата аукциона.

### 1.1. Условие останова аукциона

Условие останова аукциона может отличаться в зависимости от условий проведения аукциона. Чаще в сетевых системах используются два условия:

- Ограничение по времени: все участники знают время окончания сбора предложений и пытаются сделать ставки в заданных временных рамках. Аукцион останавливается, когда заданное время заканчивается.
- Ограничение по количеству раундов: всем участникам аукциона объявляется количество раундов и время начала и окончания сбора заявок в каждом из них. Участники должны принять решения

об очередной ставке и известить об этом аукциониста в рамках отведенного времени. Решение аукционист принимает по окончании всех раундов.

В целом условия остановки зависят от правил, выбранных аукционистом. Нам будет удобнее работать со вторым условием по ограничению количества раундов, так как всем участникам даются равные возможности по формированию предложений и анализу промежуточных результатов.

## 1.2. Правило отбора

Правило отбора аукционистом оптимального набора предложений можно задать функцией  $F$ . Чаще всего продавец желает получить максимальную прибыль от продажи актива  $a_s$ . Но также аукционист может наложить ряд ограничений. Например, возможно желание передать не все компоненты одному участнику или передать не больше  $z$  компонентов каждому участнику. Не будем рассматривать ограничения, сконцентрируемся на традиционном варианте.

Задача продавца заключается в получении максимальной прибыли от продажи актива:

$$F = \max \sum_j^l q_j^l p_j; \quad (2)$$

$$\sum_j q_j^l = k_j$$

Как видно из постановки задачи, она может быть сведена к задаче о рюкзаке (Knapsack problem). Для этого нужно последовательно рассмотреть подзадачу для каждой компоненты  $s_j$ . Решением исходной задачи будет совокупное множество оптимальных предложений, найденных для каждой компоненты в отдельности. Опишем функцию по поиску оптимального набора предложений согласно поставленной задаче (2).

Пусть  $d(i, c)$  максимальная стоимость любого возможного числа ставок для некоторой части  $s_j$  от агентов от 1 до  $i$ , суммарной стоимостью до  $c$ . Алгоритм поиска оптимального набора ставок можно записать псевдокодом:

```

1. function findOptimalSet{
2.     Input: S // предложения участников аукциона;
3.     Output: C_f
4. For all s_j
5.     for i=0 to k_j
6.         d[0][i] = 0 // база
7.         for i=1 to m
8.             for j to k_j
9.                 d[i][j] = d[i-1][j]
10.                for u = min(q_j, j/p_j) ... 1
11.                    d[i][j] = max(d[i][c], d[i-1][c-u*q_j] + u*p_j )
12.     C_f = C_f + findBids(d[0][0], k_j, m, emptyMap)
13. return C_f
14. }
```

Поиск оптимального набора ставок для каждой составной части  $s_j$  происходит в функции findBids:

```

1. function findBids(d, k, m, bidSet){
2.     if d[k, m] = 0
3.         return bidSet;
4.     if d[k-1][m] == d[k][m]
5.         findBids(d, k-1, m, bidSet);
6.     else
7.         findBids(d, k-1, m - b_j[k].p_j, bidSet);
8.         bidSet=bidSet + b_j[k]
9. }
```

Сложность алгоритма  $O(r * m * \max(k_j))$ . В данной реализации разрешаем частичное исполнение предложения участника аукциона, то есть если участник  $A_i$  сделал предложение для приобретения  $s_j$  :  $b_j = (q_j, p_j)$ , то в результате аукциона он может получить не  $q_j$ , а  $\hat{q}_j < q_j$ .

### 3. Смарт-контракт

Как можно заметить, в описании механизма есть существенный пробел, а именно, пропущено описание каналов взаимодействия участников и аукциониста. Современные методы работы в блокчейн системе позволяют переложить обязанности планировщика на умные контракты, которые будут автономно исполняться в блокчейне системе.

Рассмотрим возможный вариант контракта для описанного механизма аукциона. Описание контракта сделаем на псевдоязыке, взяв за основу язык программирования Solidity. Опустим ряд технических деталей и приведем основные функции выполнения контракта. Для работы контракта требуется определить основные элементы, которые управляют его жизненным циклом.

Для работы с предложениями участников будет удобно определить структуру Bid:

```
1. struct Bid{
2.     address bidder;// адрес участника
3.     uint shareIndex; // индекс компонента j в активе a_s
4.     uint quatativity; // предложенный объем покупки q_j
5.     uint price; //предложенная цена p_j
6. }
```

Запишем контракт с базовыми свойствами, необходимые для его функционирования:

```
1. contract BatchAuction {
2.     address seller; // адрес продавца
3.     IERC721[] a; // массив компонент для продажи;
4.     uint roundCount;// количество раундов в аукционе;
5.     uint[] roundStartAt; // время начала каждого раунда;
6.     uint[] roundEndAt; // время окончания каждого раунда;
7.
8.     address[] highestBidders; // адреса участников, которые сделали лучшее
предложение;
9.     bids[] highestBids; // лучшие предложения;
10.    bids[][] roundBids;// предложения участников, сгруппированные раундам;
11.    uint roundIndex;// индекс текущего раунда;
12. }
```

Опишем основные события, которые управляют жизненным циклом контракта:

- событие, сигнализирующее о начале исполнения контракта:

```
1. event Start();
```

- событие начала раунда с номером index:

```
1. event Round(uint index);
```

- событие получения предложения от участника sender:

```
1. event BidEvent(address indexed bidder, Bid[] bids);
```

- событие окончания аукциона:

```
1. event End(address indexed sender, address winners, bid[] optimalBids);
```

Функцию предложения ставки для участника аукциона можно записать следующим образом:

```
1. function makeBid(address indexed bidder, Bid[] bids) external payable {
2.     require(block.timestamp <= roundEndAt[roundIndex]); //проверка, что раунд не
закончился
3.     require(block.timestamp >= roundStartAt[roundIndex]);// проверка, что раунд
начался
4.     roundBids[roundIndex] = roundBids[roundIndex]+ bids;
5.     emit BidEvent(bidder, bids)
6. }
```

Функцию для старта каждого раунда представим так:

```
1. function startRound() external{
2.     roundIndex++;
3.     roundStartAt[roundIndex] = block.timestamp;
```

```

4.     roundEndAt[roundIndex] = block.timestamp + roundTime;
5.     emit Round(roundIndex);
6. }

```

Запишем функцию расчета результатов аукциона:

```

1. function end() external{
2. (highestBids, highestBidders) = findOptimalBids(roundBids); // поиск оптимального
набора предложений;
3. amount = 0;
4. for (bid in highestBids){
5.     amount+=withdrawAmount(bid.bidder , bid); //бронируется сумма у участника;
6. }
7. for (bid in highestBids){
8.     sendActivePart(a, bid); // отправка доли актива согласно предложению;
9. }
10. sendAmount(seller, amount);
11. emit End(seller, highestBidders, highestBids)
12. }

```

Работу контракта можно посмотреть на рис.1.

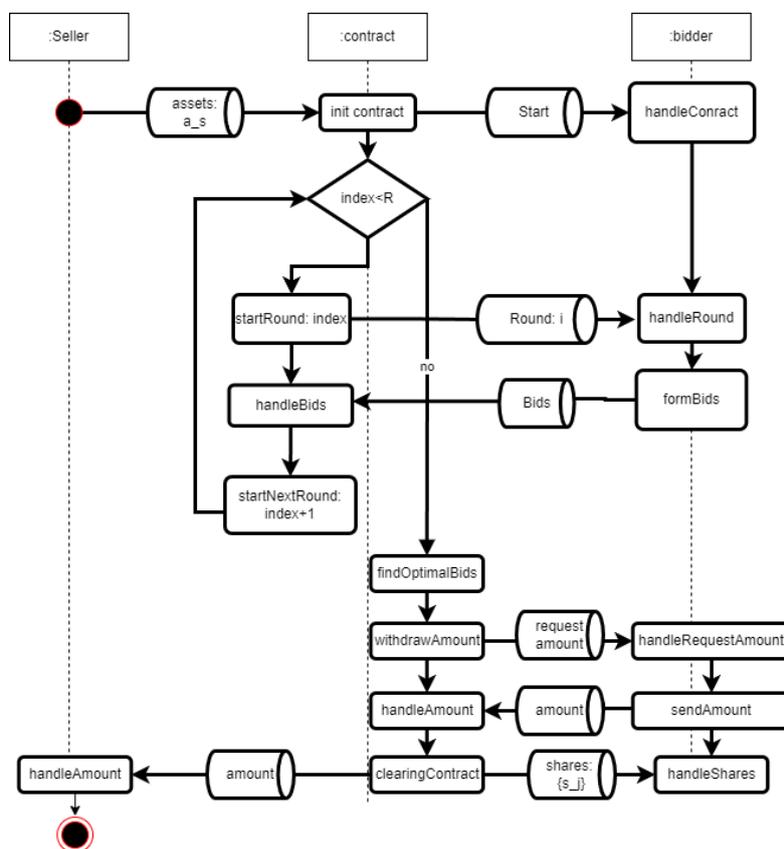


Рис.1. Блок-схема, демонстрирующая работу контракта

Представленная блок-схема дает примерное понимание работы смарт-контракта. Для наглядности показано, что смарт контракт отправляет данные участникам аукциона. На самом же деле, участники следят за событиями в сети блокчейн и реагируют на них. Каждому участнику сети также доступны технические средства, позволяющие автоматизировать этот процесс.

#### 4. Заключение

Приведенные выше блоки позволяют реализовать смарт-контракт в блокчейн сети для проведения автономного аукциона по реализации актива, который может быть разбит на составные части. В данной

работе не рассмотрены стратегии принятия решений участниками подобных аукционов. Данный вопрос является предметом следующей работы.

## Литература

1. *Гасанов И.И.* Организация аукционов в сетевых моделях // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2021. Труды четырнадцатой международной конференции. М.: ИПУ РАН (27–29 сентября 2021 года, Москва, Россия), 2021. – С. 414–422.
2. *Вахранев А.В., Гасанов И.И.* Организация производства на основе аукционов // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2022. Труды пятнадцатой международной конференции. М.: ИПУ РАН, 2022 (26–28 сентября 2022 года, Москва, Россия), 2022. – С. 451–457.
3. *He Y., Chen Y.* Blockchain-based decentralized auction mechanism for edge computing resource allocation. *IEEE Transactions on Services Computing*, 11(4), 2018. – P. 746–757.
4. *Tanweer Alam*, Blockchain and its Role in the Internet of Things (IoT). *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 2019. – С. 151–157.
5. *Ching-Nung Yang, Sheng-Lung Peng, Lakhmi C Jain.* Designing Smart-Contract Based Auctions. Vol. 895. Springer International Publishing, 2020.
6. *Braghin C., Cimato S., Damiani E., Baronchelli M.* Designing Smart-Contract Based Auctions. // Security with Intelligent Computing and Big-data Services. SICBS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 895. Springer, 2018. – P. 54–64.
7. *Huckle S., Bhattacharya R., White M., Beloff N.* Internet of things, blockchain and shared economy applications. *Procedia Computer Science*, 98, 2016. – P. 461–466.
8. *Li X., Jiang L., Chen J.* Towards secure and privacy-preserving data sharing in smart grid: A blockchain-based approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3), 2018. – С. 1965–1975.
9. *Gans J. S., Kingma B. R.* Auctions and bidding: A primer. *Journal of Economic Surveys*, 30(2), 2016. – С. 297–326.
10. *Zeng Y., Zhang P., Li H.* Blockchain-based dynamic multi-attribute auction for edge computing resource allocation // *IEEE Transactions on Services Computing*, 2018.