

Обнаружение арбитражных стратегий на рынке криптовалют

Евгений Кадыгров kadygrov.ev@phystech.edu

December 15, 2022

В данной работе будет рассмотрен, какой вид арбитража существует, какую биржу лучше выбирать, какие есть схемы работы, но большую часть займут алгоритмы поиска арбитражных возможностей на рынке криптовалют. Будет реализован поиск кратчайшего пути с циклами отрицательной длины с помощью модификации алгоритма Беллмана-Форда.

1 Что такое криптовалюта

Для того, чтобы разобраться с арбитражем, нам для начала нужно понять, что же такое криптовалюта. **Криптовалюта** — средство платежа, которое существует только в интернете. У нее нет бумажного выражения, и ее ценность не зависит от государства. Она построена на системе блокчейн — цепочке информационных блоков. Их используют для перевода цифровых денег от человека к человеку без посредника. Блокчейн — это способ хранения информации по цепи. Записи о транзакциях участников сети кодируются, распределяются между другими участниками и формируют связанные между собой блоки. Если кто-то попытается внести изменения, чтобы получить валюту нечестным способом, например переписать существующую транзакцию или создать новую без согласия других участников, система сравнит эту информацию с другими базами данных и заблокирует операцию.

2 Понятие арбитража

2.1 Простое определение арбитража

Арбитраж — операции, нацеленные на извлечение прибыли от разницы котировок, связанных активов. Внутри биржи дисбаланс разницы курсов обусловлен следующими факторами:

- 1) Разобщённость криптобирж в силу децентрализации отрасли и отсутствия единых систем принятия управленческих решений. Относительное сжатие картинок для задачи сжатия
- 2) Дефицит криптовалюты на одной площадке и достаточное количество на другой
- 3) Разница объёмов торгов — обычно, чем выше объем, тем ниже цены. Низкие объёмы характерны для молодых сервисов с ограниченным перечнем активов и/или способов ввода/вывода, с высокими комиссиями по операциям.

2.2 Сложное определение арбитража

[7] Чтобы дать формальные определения, будем считать, заданным фильтрованное вероятностное пространство

$$(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}, \mathcal{P})$$

на котором функционируют (B, S) - рынок, состоящий из $d + 1$ актива:

$$\text{банковского счета } B = (B_n)_{n \geq 0}$$

с \mathcal{F}_{n-1} -измеримыми $B_n, B_n > 0$, и

$$d - \text{мерного рискового актива } S = (S^1, \dots, S^d)$$

где $S^i = (S_n^i)_{n \geq 0}$, $S_n^i - \mathcal{F}_n$ -измеримы, $S_n^i > 0$

Пусть $X^\pi = (X_n^\pi)_{n \geq 0}$ -капитал,

$$X_n^\pi = \beta_n B_n + \gamma_n S_n = \beta_n B_n + \sum_{i=1}^d \gamma_n^i S_n^i$$

отвечающий стратегии $\pi = (\beta, \gamma)$ с предсказуемыми $\beta = (\beta_n)_{n \geq 0}$ и $\gamma = (\gamma^1, \dots, \gamma^d)$, $\gamma^i = (\gamma_n^i)_{n \geq 0}$

Если π -самофинансируемая стратегия ($\pi \in SF$), то

$$X_n^\pi = X_0^\pi + \sum_{k=1}^n (\beta_k \Delta B_k + \gamma_k \Delta S_k), n \geq 1$$

и нормированный капитал $\tilde{X}_n^\pi = (\frac{X_n^\pi}{B_n})_{n \geq 0}$ удовлетворяет соотношениям

$$\Delta(\frac{X_n^\pi}{B_n}) = \gamma_n \Delta(\frac{S_n}{B_n})$$

Зафиксируем некоторое $N \geq 1$ и будем интересоваться значением капитала $X_N^{\pi i}$ той или иной стратегии $\pi \in SF$ в этот "терминальный" момент времени.

Определение: говорят, что самофинансируемая стратегия π реализует арбитражную возможность (в момент N), если при нулевом начальном капитале

$$X_0^\pi = 0$$

ее капитал в момент времени N

$$X_N^\pi \geq 0 \quad (n.n.) \quad \text{и} \quad \mathcal{P}(X_N^\pi > 0) > 0 \iff \mathbf{E}X_N^\pi > 0$$

Пусть SF_{arb} класс арбитражных самофинансируемых стратегий. Тогда, если $\pi \in SF_{arb}$ и $X_0^\pi = 0$, то

$$\mathcal{P}(X_N^\pi \geq 0) = 1 \Rightarrow \mathcal{P}(X_N^\pi > 0) > 0$$

2.3 Виды арбитража [1]

Классический

Классический арбитраж предполагает цепочку сделок, совершаемых *одномоментно*, когда:

1. на одной площадке актив покупается дешевле, на другой продаётся дороже
2. аналогичные действия совершаются на трёх биржах
3. на одной площадке проводятся операции с тремя и более парами
4. проводят сделки на разных площадках, в которых задействована одна система

С временным разрывом:

1. покупка базового актива и продажа срочного контракта
2. с игрой на связанных активах (например, BTC/LTC и LTC/BTC), когда рост курса одной пары обгоняет другую или напротив снижается

Статистический

В статистическом арбитраже извлечение прибыли осуществляется из *рыночной неэффективности*:

1. из чересчур высокой/низкой текущей волатильности, относительно исторической
2. из разнонаправленного движения активов с корреляцией 50 процентов и выше, то есть, покупкой/продажей коррелирующих инструментов при разрыве спреда выше среднего с последующей продажей при сужении спреда

2.4 Схемы работы

Межбиржевой арбитраж

Простой межбиржевой арбитраж предполагает покупку/продажу криптовалюты на одной площадке, перевод на другую и обратную операцию. Такие возможности предоставляются нечасто. Нужно учитывать комиссию за перевод и время транзакции целевого криптоактива, так как котировки могут измениться на несколько минут.

К сложностям межбиржевого арбитража можно отнести следующие факторы:

1. Ограничения со стороны торговых платформ. Биржи, которые находятся под контролем регуляторов, могут отслеживать подозрительную активность и блокировать ее.
2. Возможность задержки вывода из биржи. Любые операции, занимающие время в процессе арбитража, повышают риск снижения прибыли или получения убытков. Этот фактор нивелируется за счет применения лонг- и шорт-ордеров.
3. Необходимость учитывать комиссии за сделки и межбиржевые транзакции. Они уменьшают прибыль от разницы между ценой покупки и продажи.

Ключевое преимущество межбиржевой торговли — возможность получения профита почти без риска. Для арбитража нормальной прибылью с одной цепочки сделок считается 0,01, но при интенсивной торговле можно получать и более высокий доход.

Внутрибиржевой арбитраж

Внутрибиржевой арбитраж предполагает проведение серии сделок внутри одной платформы. При этом используется минимум три связанные торговые пары. Прибыль получается за счет резкой раскорреляции курсов.

С учетом расходов на комиссии, внутрибиржевой арбитраж более выгоден, чем работа с несколькими площадками, так как не нужно платить за перевод средств между ними.

Еще одно преимущество этого вида арбитража состоит в том, что трейдер не тратит время на транзакции между биржами. Поэтому торговля в формате внутрибиржевого арбитража позволяет максимально быстро реагировать на рыночные изменения.

Ощутимый недостаток внутрибиржевого арбитража — в ограничениях со стороны самих бирж. Они постоянно анализируют котировки с целью выявления корреляции курсов. Найденная разница быстро устраняется, из-за чего арбитраж зачастую дает нулевую прибыль.

Чтобы увеличить общий доход, лучше комбинировать межбиржевой и внутрибиржевой арбитраж.

3 Криптовалютные биржи [5]

3.1 Что такое биржа криптовалюты

Криптовалютная биржа — это место, где вы можете обменять обычные, фиатные деньги (доллары, рубли и евро) на криптовалюту и обратно. Или продать одну криптовалюту за другую.

3.2 Чем биржа отличается от обменника?

Когда вы покупаете криптовалюту в обменнике:

1. фиксированный курс, который устанавливает обменник каждый день
2. вы покупаете криптовалюту напрямую у обменника

На криптовалютной бирже:

1. вы покупаете криптовалюту у других пользователей, как на маркетплейсе
2. вы видите все предложения о покупке/продаже от других пользователей — это называется “стакан”

3. вы можете сами установить цену на покупку или продажу криптовалюты. Сделка совершится, когда найдется встречное предложение

Обменник зарабатывает на разнице курсов плюс комиссии. Они выкупают криптовалюту на разных площадках чуть подешевле, затем продают чуть дороже.

Основной доход биржи — комиссия от сделок. А сами торги и приток криптовалюту обеспечивают участники торгов — трейдеры. Обмен валютами происходит именно между ними, биржа выступает как посредник

3.3 Виды криптовалютных бирж:

Биржи в основном отличаются по одному параметру — централизации. Есть три вида криптобирж:

1. Централизованные (CEX). В централизованной бирже все деньги пользователей хранятся на самой бирже. Главное преимущество централизованной биржи то, что она туда можно прийти с фиатными (настоящими) деньгами, например, рублями и купить за них криптовалюту. В децентрализованных биржах можно обмениваться только криптовалютой. На централизованных биржах нельзя торговать анонимно. Присутствует 2 вида комиссии: комиссия сети и комиссия сервиса. Комиссия сети - это комиссия самой сети блокчейна за исполнение транзакции, по сути - плата майнеру за работу. Ну и комиссия сервиса - то, что криптобиржа берет себе.
2. Децентрализованные (DEX). Осуществляет обмен криптой между пользователями без хранения средств на своих кошельках. Работает только для криптовалюты, фиатные средства (рубли, доллары, евро) тут не подходят. Децентрализованная биржа не требует пополнения депозита — вы подключаете свой крипто-кошелек и обмениваетесь с другими пользователями криптовалютой напрямую. Комиссия за обмен выше, чем у некоторых централизованных бирж. Устройство умных контрактов для обмена криптой между кошельками позволяет меняться валютой только в рамках одной блокчейн-сети. Это значит, что, вы не можете поменять биткоин на эфириум, так как они работают в разных блокчейнах.
3. Peer-to-peer (p2p). От полноценной криптобиржи такие платформы отличает то, что на них нет совсем никакого регулирования — ни компания, предоставляющая площадку, ни умные контракты не гарантируют надежность транзакции.

В дальнейшем мы будем пользоваться централизованной криптобиржей Binance.

4 Арбитражные возможности

4.1 Обзор подхода

На современных криптовалютных рынках каждую секунду совершаются десятки, а иногда и сотни сделок, курсы валют меняются быстро и непредсказуемо. Напомним, под арбитражной возможностью принято понимать возможность извлечения прибыли посредством совершения нескольких логически связанных сделок с одинаковыми или связанными активами в один и тот же момент времени на разных рынках, либо на одном и том же рынке в разные моменты времени.

Стоимость валют в настоящий момент времени на рынке можно представить в виде полного орграфа с взвешенными ребрами, где наименования валют – это вершины, а обменный курс – это ребра. Таким образом, возникает задача нахождения цикла в орграфе после прохождения которого, единица исходной валюты преобразуется в более, чем одну единицу. Иначе говоря, необходимо найти такой цикл в орграфе, произведение весов ребер которого будут больше единицы.

4.2 Обзор модели

Если рассмотреть рынок финансовых транзакций, основанный на торговле валютой, то можно увидеть некоторые возможности применения задачи поиска отрицательных циклов.

Рынок криптовалют можно представить в виде таблицы:

	BTC	XRP	ETH	USDT	TRX
BTC	1	41389.7	13.5	16413.1	306370.2
XRP	0.000024	1	0.00033	0.396	7.39
ETH	0.074	3063.16	1	1214.55	22671.35
USDT	0.0000608	2.518	0.00082	1	18.65
TRX	0.0000033	0.135	0.000044	0.054	1

В то же время, такую таблицу можно представить в виде ориентированного полносвязного графа, где вершины соответствуют валютам, а ребра - обменным курсам:

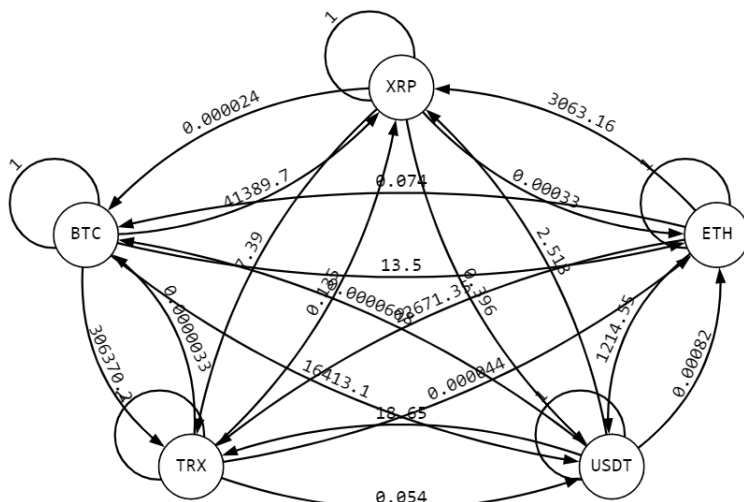


Figure 1: Полносвязный ориентированный граф валют

Ребро $s \rightarrow t$ с весом x соответствует обмену s на t по цене x , а ребро $t \rightarrow u$ с весом y соответствует обмену t на u по цене y . Пути на этом орграфе задают многоступенчатые обмены. Интересен случай, когда произведение весов ребер меньше веса ребра из последней вершины назад к первой. Пусть вес ребра $u \rightarrow s$ равен z и что $xyz > 1$. Тогда цикл $s \rightarrow t \rightarrow u \rightarrow s$ позволяет обменять 1 единицу валюты s в более чем 1 единицу валюты s , а точнее обменять в xyz . То есть можно получить прибыль в $100 \cdot (xyz - 1)$ процентов, поменяв s через t и u и обратно на s .

Подобная ситуация представляет собой пример возможности арбитража, который позволял бы трейдерам получать неограниченные прибыли, если бы не было ограничивающих факторов за пределами этой модели, таких как комиссия за транзакции или ограничения на размеры транзакций. Но даже и с учетом этих ограничений арбитраж может быть весьма прибылен в реальном мире.

4.3 Связь с алгоритмом Беллмана-Форда [4]

Какое отношение имеет эта задача к кратчайшим путям?

Задача арбитража представляет собой задачу обнаружения отрицательных циклов в орграфе с взвешенными ребрами.

Что дальше делать с графом?

Встает вопрос, как в таком графе найти последовательность сделок, которая принесет прибыль. Очевидно, что так как в начале последовательности и в её конце должна быть одна и та же валюта, то последовательность должна соответствовать циклу в заданном графе. Далее необходимо определиться с тем, как вычисляется обменный курс между двумя валютами, если они обмениваются не напрямую, а через некую третью валюту (или произвольное количество промежуточных операций).

Тут всё тоже достаточно просто. Такой обменный курс будет вычисляться как произведение обменных курсов промежуточных сделок. Прибыльной последовательность сделок становится, если это произведение принимает значение меньше единицы. Другими словами, если единицу валюты можно купить меньше, чем за единицу этой же самой валюты.

Классические алгоритмы на графах плохо подходят для работы с произведением длин ребер. Такие алгоритмы, в основном, заточены на нахождение пути, который определяется как сумма этих длин. Однако для обхода этого ограничения существует математический способ перейти от произведения к сумме.

Таким способом является логарифмирование. Если под логарифмом оказывается произведение, то такой логарифм может быть преобразован в сумму логарифмов. В правой же части этого уравнения желаемым является число меньше единицы, а значит, логарифм этого числа должен быть меньше нуля. То есть любое произведение $w_1 \cdot w_2 \cdot \dots \cdot w_k$ соответствует $\sum -\ln(w_1) - \ln(w_2) - \dots - \ln(w_k)$. Полученные веса ребер могут быть положительными или отрицательными, путь от v до w означает обмен валюты v на валюту w , а любой отрицательный цикл означает возможность арбитража.

Такой прием позволяет перейти от поиска цикла, произведение длин ребер которого меньше единицы, к поиску цикла, сумма длин ребер которого меньше нуля. Такая задача уже выглядит более решаемой классическими графовыми алгоритмами, а точнее алгоритмом Беллмана — Форда.

4.4 Алгоритм Беллмана-Форда с модификацией

Алгоритм Форда-Беллмана представляет из себя несколько фаз. На каждой фазе просматриваются все рёбра графа, и алгоритм пытается произвести релаксацию (relax, ослабление) вдоль каждого ребра (a, b) стоимости c . Релаксация вдоль ребра — это попытка улучшить значение $d[b]$ значением $d[a] + c$. Фактически это значит, что мы пытаемся улучшить ответ для вершины b , пользуясь ребром (a, b) и текущим ответом для вершины a .

Утверждается, что достаточно $n - 1$ фазы алгоритма, чтобы корректно посчитать длины всех кратчайших путей в графе [2].

При наличии цикла отрицательной длины возникают дополнительные сложности, связанные с тем, что расстояния до всех вершин на этом цикле, а также расстояния до достижимых из этого цикла вершин не определены — они должны быть равны минус бесконечности.

Нетрудно понять, что алгоритм Беллмана-Форда сможет бесконечно делать релаксации среди всех вершин этого цикла и вершин, достижимых из него. Следовательно, если не ограничивать число фаз числом $n - 1$, то алгоритм будет работать бесконечно, постоянно улучшая расстояния до этих вершин.

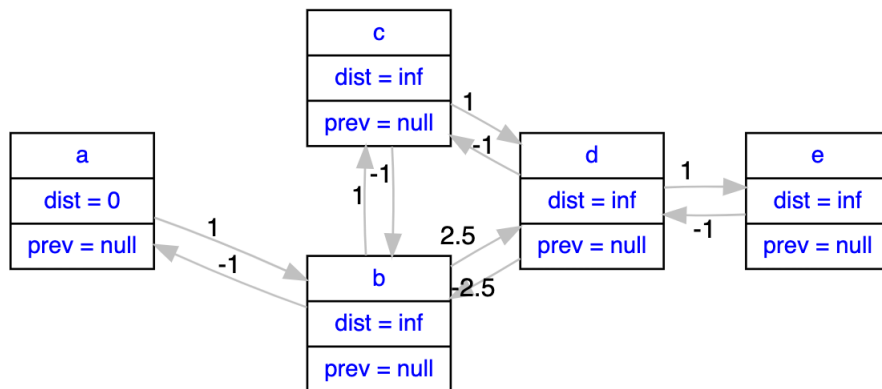
Отсюда мы получаем **критерий наличия достижимого цикла отрицательного веса**: если после $n - 1$ фазы мы выполним ещё одну фазу, и на ней произойдёт хотя бы одна релаксация, то граф содержит цикл отрицательного веса, достижимый из v ; в противном случае, такого цикла нет.

Более того, если такой цикл обнаружился, то алгоритм Форда-Беллмана можно модифицировать таким образом, чтобы он выводил сам этот цикл в виде последовательности вершин, входящих в него. Для этого достаточно запомнить номер вершины x , в которой произошла релаксация на n -ой фазе. Эта вершина будет либо лежать на цикле отрицательного веса, либо она достижима из него. Чтобы получить вершину, которая гарантированно лежит на цикле, достаточно, например, n раз пройти по предкам, начиная от вершины x . Получив номер y вершины, лежащей на цикле, надо пройти от этой вершины по предкам, пока мы не вернёмся в эту же вершину y (а это обязательно произойдёт, потому что релаксации в цикле отрицательного веса происходят по кругу) [3].

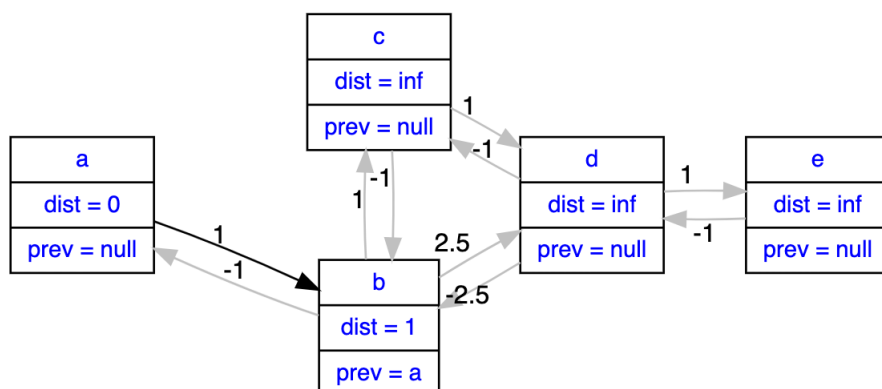
4.5 Пример графа с отрицательным циклом

Разберем пример с небольшим графом, в состав которого входит цикл отрицательной длины. Для работы алгоритма необходимо для каждой вершины поддерживать текущее известное расстояние до неё, а так же ссылку на её предыдущую вершину. Ссылка на предыдущую вершину в данном случае определяется успешной релаксацией ребра. Если операция релаксации прошла успешно, и дистанция до вершины была обновлена, то ссылка на предыдущую вершину этой вершины также обновляется и принимает значение вершины-источника заданного ребра.

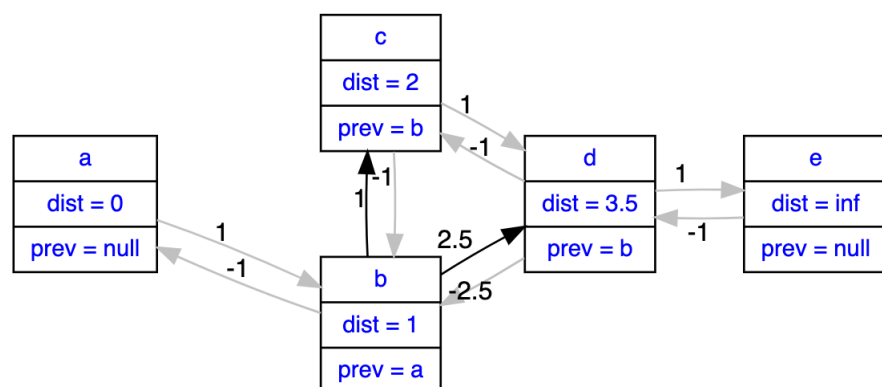
Итак, для начала необходимо инициализировать вершины, установив дистанцию до всех вершин кроме начальной равной бесконечности. Для начальной вершины устанавливается дистанция равная нулю.



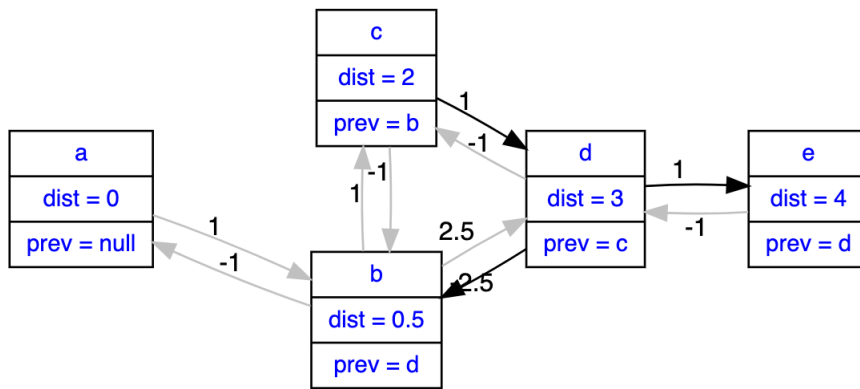
Далее следует первый обход всех ребер и выполняются их релаксации. Практически все релаксации не дают никакого результата, кроме релаксации ребра $a \rightarrow b$. Релаксация данного ребра позволяет обновить расстояние до b .



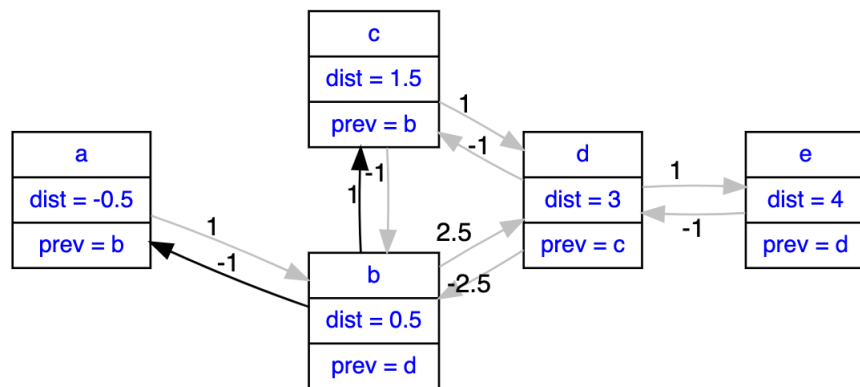
Далее следует второй обход всех рёбер графа и соответствующие релаксации. На этот раз результат дают релаксации ребер $b \rightarrow c$, а также $b \rightarrow d$. Обновляются расстояния до вершин c и d . Тут следует заметить, что результат зависит от того, в каком порядке происходит обход ребер.



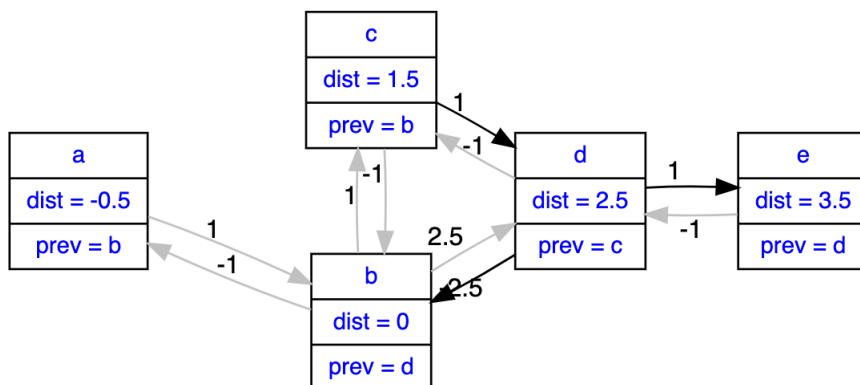
При третьем обходе ребер удастся успешно релаксировать уже три ребра, а именно ребра $a \rightarrow d$, $d \rightarrow e$, $d \rightarrow b$. При этом, при релаксации ребер $a \rightarrow d$ и $d \rightarrow b$ обновляются уже записанные ранее расстояния до d и b , а так же соответствующие ссылки на предыдущие вершины.



При четвертом обходе успешно заканчиваются операции релаксации ребер $b \rightarrow c$ и $b \rightarrow a$. При этом опять обновляются уже записанные значения расстояний до вершин a и c , как и соответствующие ссылки на предыдущие вершины.



Пятый обход является последним. При этом обходе релаксируются ребра $b \rightarrow d$, $d \rightarrow b$, $d \rightarrow e$. Тут можно заметить, что наличие цикла отрицательной длины уже вносит определенные корректировки в значения расстояний до вершин.

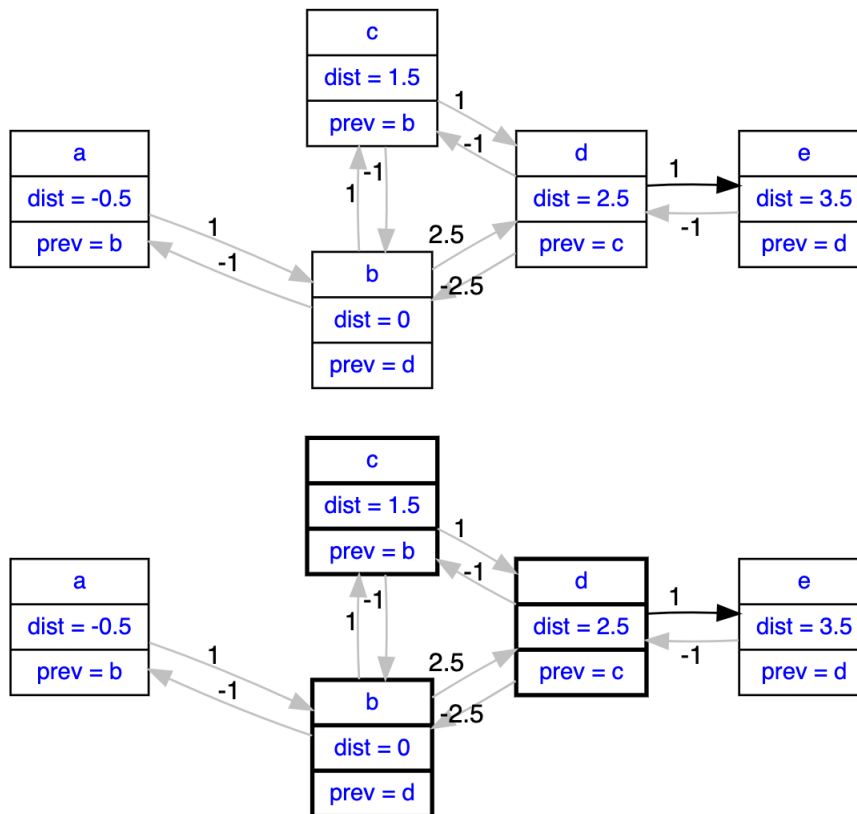


После этого обхода, если бы граф не содержал цикла отрицательной длины, алгоритм был бы закончен, так как релаксация любого ребра уже не внесла бы никаких изменений. Однако для данного графа из-за наличия цикла отрицательной длины, все еще можно найти ребро, релаксация которого обновит значения расстояния до одной из вершин.

Ребро, релаксация которого обновляет расстояние до вершины, найдено. Это подтверждает наличие цикла отрицательной длины. Теперь необходимо найти сам этот цикл. Важно, что вершина, расстояние до которой сейчас обновилось, может быть как внутри цикла, так и вне него. В примере это вершина e и она вне цикла. Далее необходимо обратиться к ссылкам на предыдущие вершины, которые аккуратно обновлялись на всех шагах алгоритма. Чтобы гарантированно попасть в цикл, необходимо отступить назад на N вершин, пользуясь этими ссылками.

В данном примере переходы будут следующие: $e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow d \rightarrow c$. Таким образом находится вершина c , которая гарантированно лежит в цикле отрицательной длины.

Чтобы вернуть искомый цикл, нужно опять итерироваться по ссылкам на предыдущие вершины, пока



опять не встретится вершина *c*. Это будет значить, что цикл замкнулся. Остается только изменить порядок на обратный, так как при итерациях по ссылкам на предыдущие вершины порядок был инвертирован.

В приведенном алгоритме предполагается наличие некоторой изначальной вершины, от которой рассчитываются расстояния. Наличие такой вершины не является обязательным для работы алгоритма, а введена она в большей степени для соответствия изначальному алгоритму Беллмана — Форда. Если же предметом интереса является цикл отрицательной длины, то можно считать, что все вершины заданного графа являются начальными. Другими словами, что дистанция до всех вершин изначально равна нулю. [4]

4.6 Эксперименты

Мной была реализована программа, которая с помощью модификации алгоритма Беллмана-Форда находит арбитражные возможности на рынке криптовалют.

Изначально, мы вводим кол-во криптовалют, по которым мы хотим найти арбитражную возможность, а потом условные обозначения.

Алгоритм по API запрашивает курсы валют. К примеру, для BTC, ETH и LTC он выведет BTC/ETH, BTC/LTC, ETH/BTC, ETH/LTC, LTC/BTC и LTC/ETH.

Затем мы составляем матрицу смежности, при этом учитывая, что ставка комиссии фиксированная и составляет 0.1%. А значит все веса мы умножаем на 0.999.

После этого свою работу начинает алгоритм Беллмана-Форда, который ищет цикл отрицательной длины.

Ну и все завершается визуализацией графа, с подсвеченным отрицательным циклом, путем для такого цикла и профитом, который мы можем получить. Это происходит, если цикл отрицательной длины найден. Если же нет, то мы просто выводим граф и пишем, что арбитражная возможность не найдена.

Арбитражная возможность не нашлась

Введите кол-во криптовалют:
6
Введите краткие названия криптовалют:
TON
LEO
SHIB
LTC
DAI
CRO

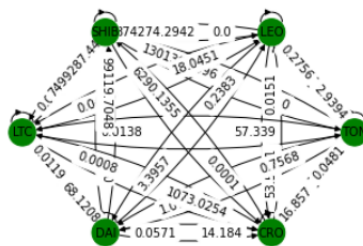
Собираем курсы, запускаем алгоритм Беллмана-Форда, ищем арбитражную возможность...

TON/LEO= 0.27594
TON/SHIB= 130140.0
TON/LTC= 0.01377
TON/DAI= 1.0719
TON/CRO= 16.857
LEO/TON= 2.9349
LEO/SHIB= 372532.896
LEO/LTC= 0.044829
LEO/DAI= 3.3975
LEO/CRO= 53.424
SHIB/TON= 6.2e-06
SHIB/LEO= 2.2e-06
SHIB/LTC= 1e-07
SHIB/DAI= 8.2e-06
SHIB/CRO= 0.0001291
LTC/TON= 57.384
LTC/LEO= 18.072
LTC/SHIB= 7487486.28
LTC/DAI= 68.211
LTC/CRO= 1072.665

DAI/TON= 0.75681
DAI/LEO= 0.23832
DAI/SHIB= 99118.944
DAI/LTC= 0.011898
DAI/CRO= 14.184
CRO/TON= 0.048051
CRO/LEO= 0.015138
CRO/SHIB= 6290.091
CRO/LTC= 0.0007549
CRO/DAI= 0.057114

Нет арбитражной возможности .

Нет арбитражной возможности, тк нет цикла отрицательной длины.



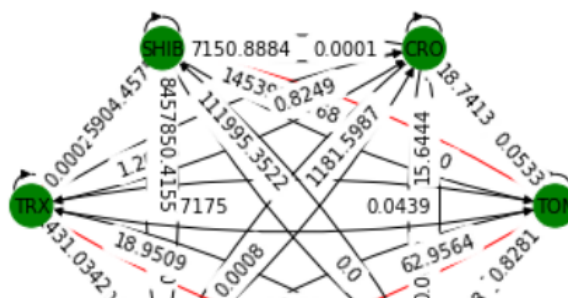
Арбитражная возможность нашлась (одна из лучших попыток)

Arbitrage opportunity found:

TON --> SHIB --> TRX --> DAI --> LTC --> TON

Profit: 1.2599

ARBITRAGE OPPORTUNITY



Found Negative Cycle:

TON --> SHIB --> LTC --> TRX --> DAI --> LTC --> TON

Profit: 1.2599

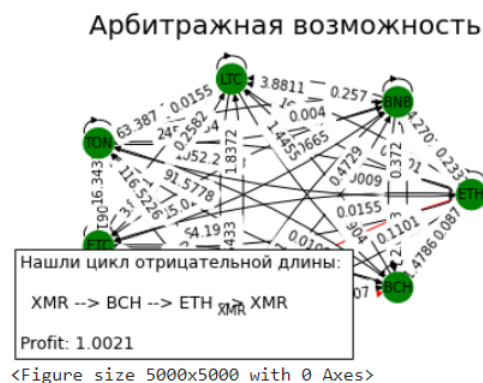
```

Введите кол-во криптовалют:
7
Введите краткие названия криптовалют:
ETH
BNB
LTC
TON
ETC
XMR
BCH

Запрашиваем курсы, запускаем алгоритм Беллмана-Форда, ищем арбитражную возможность...

Арбитражная возможность найдена:
XMR --> BCH --> ETH --> XMR
Profit: 1.0021

```



4.7 Эксперименты на исторических данных

Был проведен следующий эксперимент - я взял 6 ликвидных криптовалют ETC, LTC, EOS, TRX, ETH и BCH. Скачал курсы за каждый час за прошлую неделю и прогнал через алгоритм. Это было сделано для того, чтобы посмотреть принесет ли данная стратегия какой-то плюс, или же легче просто сделать вклад в банке. Как показали эксперименты, арбитражная возможность находилась приблизительно в 1 из 6 случаев. При этом арбитражная возможность в среднем равнялась 1.002. Даже в таком случае за неделю, с учетом того, что у нас изначально было 100 ед., мы бы получили 105.75385 ед. по итогу. А если бы мы сделали вклад под 5%, то получили бы 105 только бы через месяц. Но тк эта стратегия сильно смоделирована, то она не учитывает много факторов, и в реальности я бы скорее сделал вклад, но как эксперимент - было интересно, и эту стратегию можно доработать и тогда использовать.

5 Выводы

Как и ожидалось, на современных рынках есть арбитражные возможности, в этом можно убедиться на примере полученных в ходе представленных исследований результатов.

Основной задачей, которая остается так до конца и нерешенной, является нахождения оптимального алгоритма поиска арбитражных возможностей, т.е. алгоритма с минимальным временем выполнения. Потому что к примеру мой алгоритм можно еще сильно дорабатывать - подумать, как эффективнее загружать данные, и возможно не самому выбирать криптовалюты для поиска, а чтобы поиск шел по всевозможным.

Также интересную и нерешенную задачу представляет собой алгоритм нахождения наиболее отрицательных циклов, алгоритм поиска наилучшей возможности арбитража.

Арбитражные возможности находятся не так часто, как хотелось бы. И профит от них не очень большой. Как возможность заработать небольшие деньги, применяя минимальное кол-во усилий - вариант неплохой, но для полноценного арбитража нужно выходить на межбиржевой арбитраж, который принесет ряд дополнительных проблем

Также, эту программу можно преобразовать в бота, который сам будет искать и проводить сделки, но этим я займусь когда-нибудь потом...

6 Источники информации

1. [Информация об арбитраже](#)
2. [Алгоритм Беллмана-Форда](#)
3. [Поиск отрицательных циклов](#)
4. [Арбитражная торговля с помощью алгоритма Беллмана-Форда](#)
5. [Криптовалютные биржи](#)
6. Ширяев А.Н. Основы Стохастической Финансовой Математики 2