

О ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ИМИТАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГНОЗА ИНС

Гасанов И.И., Ерешко Ант.Ф.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2
gasanov48@bmail.ru, asprs@yandex.ru

Аннотация: Рассматриваются предложения по совместному использованию авторского имитационного комплекса и прогноза цен, порождаемого Искусственной нейронной сетью, при формировании стратегий управления для биржевой торговли.

Ключевые слова: высокочастотные финансовые приложения, алгоритмический трейдинг, искусственные нейронные сети, прогноз, управление, имитация.

Введение

В последние десятилетия на волне бурного развития методов Искусственного интеллекта [1 – 3] было опубликовано значительное количество работ по прогнозированию временных последовательностей на базе Искусственных нейронных сетей (ИНС) [1, 2]. Авторы настоящей работы в течение ряда лет успешно применяли стратегии высокочастотной биржевой торговли для разных финансовых инструментов. Для этих целей был разработан программный комплекс, который включал в себя блок автоматизированной торговли и который в дальнейшем будем именовать торговым роботом. Существо технологии состояло в том, что из показателей динамики рынка конструировались некоторые агрегированные признаки, которые позволяли относительно эффективно прогнозировать на короткие промежутки времени тренды цен, и на базе этих прогнозов программно принимались решения о торговых операциях.

Такая технология очень сходна с тем, что может делаться с помощью ИНС. Отличие в том, что в нашей практике параметры управления выбирались и настраивались не посредством ИНС, а вручную на основе разумных соображений, догадок и практического опыта. Естественно желание заменить такой, по сути, эвристический подход более мощным и точным инструментом, который могло бы предоставить использование аппарата ИНС. В настоящем докладе представлены соображения, как такой инструмент можно было бы внедрить в уже созданный программный комплекс.

1 Организация биржевой торговли

Чтобы сделать понятным представление нового проекта и обойтись без отсылок к предыдущим работам [4, 5], опишем объект на котором программный комплекс использовался. Это биржевая площадка, на которой осуществляется электронная торговля одним из инструментов срочного (фьючерсного) или спотового рынка.

Сделки на такой площадке производятся согласно ордерам, поступающим от участников торгов по цифровым каналам связи. Каждый ордер – это заявка на операцию с торгуемым инструментом. Используются также ордера на снятие ранее выставленных заявок.

Существует несколько типов заявок. Здесь будем рассматривать только один из них, так называемые лимитные заявки. Лимитная заявка характеризуется набором параметров, из которых для нас важны следующие: направление заявки, т.е. какая это заявка – на покупку актива или на продажу; цена заявки, т.е. та наименее выгодная цена, на которую согласен автор заявки; объём заявки; время авторизации, т.е. момент времени, когда заявка была обработана биржей.

Цены заявок имеют минимальный шаг дискретизации h . Также дискретизированы и объёмы заявок, которые измеряются в условленных минимальных объёмах актива – лотах.

Поступающие от участников торгов заявки встают в очередь на обработку (авторизацию). В каждый момент времени биржа обрабатывает не более одной новой заявки. Моменты авторизации – это некоторые точки на временной оси $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_N$, где через τ_0 обозначен момент первой авторизации после начала торгов, а через τ_N – последней перед её окончанием. Протяжённость интервалов между очередными авторизациями варьируется и зависит как от производительности биржевого сервера, так и от интенсивности торговли. Это время составляет от долей миллисекунды до нескольких секунд.

В момент обработки новой заявки биржа пытается свести её с противоположной по направлению ранее авторизованной заявкой. Под сведением понимается осуществление сделки между инвесторами, подавшими "сводимые" по ценам заявки. Такая сделка означает, что каждый из контрагентов получает контракт на приобретение некоторого равного количества лотов: один контрагент – контракт на покупку актива, другой – на его продажу. В случае спотовой торговли немедленной покупки или продажи, а в случае фьючерсной – будущей.

Пусть, к примеру, обрабатывается заявка B на покупку актива с ценой C^B и объёмом V^B . Биржа ищет среди уже обработанных, но не полностью реализованных заявок на продажу такие, у которых цена $C^A \leq C^B$. Если такие заявки имеются, то оформляются сделки. Заявка B в первую очередь будет сведена с заявкой A на продажу актива с минимальной ценой C^A . Если таких заявок несколько, то сначала с той из них, которая была авторизована раньше. Объём сделки, т.е. объём лотов в контрактах её участников составит величину $\min[V^A; V^B]$. Если операция не исчерпывает объём обрабатываемой заявки B полностью, т.е. если объём $V^A < V^B$, то для сведения остатка заявки B , объёма $V^B - V^A$, биржа выбирает следующую по приоритету заявку на продажу A' с ценой $C^{A'} \leq C^B$. Если такая имеется, то это будет следующая авторизованная после заявки A заявка с ценой $C^{A'} = C^A$. Объём этой сделки будет $\min[V^{A'}; V^B - V^A]$. Если такой заявки нет, то для сведения берётся самая ранняя заявка с ценой $C^{A'} = C^A + h$ и т.д. При сведении двух заявок сделка всегда производится по цене той заявки, которая была авторизована раньше.

При авторизации заявок на продажу всё организовано так же, но "с обратным знаком".

Если при авторизации лимитной заявки G общий объём заявок, пригодных для её сведения, меньше V^G , то она с оставшимся объёмом присоединяется к множеству других несведённых заявок. После этого она находится в ожидании сведения с вновь поступающими заявками или снятия создавшим её инвестором. Отметим, что такая заявка в дальнейшем может быть сведена не только с лимитными заявками, но и с противоположными заявками других типов.

Множество лимитных заявок, находящихся в ожидании сведения, разделено на два структурированных подмножества, это так называемые Книги заявок (Order Books) или Стаканы. Одна Книга заявок, стакан Бид – это заявки на покупку актива; другая Книга, стакан Аск – это заявки на его продажу. Каждый из стаканов рассекается на уровни: B_0, B_1, \dots, B_n для Бид и A_0, A_1, \dots, A_n для Аск. Уровень стакана – это множество заявок с одинаковой ценой. Эти цены обозначим через C^{A_n} и C^{B_n} . Отрезок $C^{A_0} - C^{B_0}$ будем называть спредом. Чем больше индекс у уровня, тем дальше он отстоит от спреда, т.е. $C^{B_n} < \dots < C^{B_1} < C^{B_0}$ и $C^{A_0} < C^{A_1} < C^{A_n}$.

Минимальная разница в цене между соседними уровнями равна шагу цены h . Однако, при нумерации стаканов уровни, на которых в текущий момент нет заявок, пропускаются. Таким образом, разность в ценах между соседними уровнями всегда кратна h . Помимо цены, уровень характеризуется количеством и общим объёмом составляющих его заявок.

Биржа регулярно и с высокой частотой передаёт участникам торгов информацию о произведённых сделках и текущем состоянии стаканов, указывая параметры каждого уровня. Участник торгов получает эту информацию с некоторой незначительной задержкой η_i , которая зависит от интенсивности торгов к моменту t .

2 Стратегия инвестора

В рамках рассматриваемого проекта инвестор принимает решения об операциях в моменты времени t_0, t_1, \dots, t_K , следующие друг за другом с некоторым выбранным им фиксированным шагом λ . Моменты t_0 и t_K несколько отстоят от начала и окончания сессии. В точке t_k инвестор обладает всей информацией, полученной им от биржи с начала сессии, т.е. от момента t_0 до момента $t_k - \eta_{t_k}$. Данные о текущих биржевых показателях, по которым инвестор принимает решения, изменяются с каждой новой порцией информации от биржи об очередных авторизациях заявок. Значение какой-либо величины Y до момента авторизации τ_n будем помечать верхним индексом минус, т.е. как Y^- , а непосредственно после авторизации как Y^+ .

В течение сессии инвестор в моменты t_k выставляет новые заявки на покупку или продажу актива, по которым в моменты авторизации τ_n могут происходить сделки. Эти сделки изменяют корзину инвестора, т.е. общий объём всех его открытых и непогашенных контрактов, а также объём его оборотных средств. В корзине всегда только лоты на покупку либо на продажу актива, так как вновь приобретенные лоты и противоположные по направлению лоты из корзины взаимно погашаются. Текущий объём лотов в корзине принято называть позицией. Если корзину составляют лоты на покупку, то позицию будем обозначать положительным числом, если на продажу, то отрицательным.

Предположим, к некоторому моменту авторизации τ_n позиция инвестора равна $m_{\tau_n}^-$, а его оборотные средства – $Q_{\tau_n}^-$. Пусть в момент τ_n инвестором приобретается μ лотов по цене C . Это изменяет его позицию. Если приобретаются лоты на покупку актива, то их количество учитывается со знаком плюс, если на продажу, то со знаком минус. Позиция становится равной

$$m_{\tau_n}^+ = m_{\tau_n}^- + \mu. \quad (1)$$

Оборотные средства изменяются следующим образом

$$Q_{\tau_n}^+ = Q_{\tau_n}^- - \mu \cdot C - \nu \cdot |\mu|. \quad (2)$$

Здесь ν – комиссия биржи.

Баланс по счёту инвестора в течение текущей сессии в произвольный момент t оценивается как

$$G_t = Q_t + m_t \cdot \tilde{C}_t. \quad (3)$$

Здесь \tilde{C}_t – текущая оценка стоимости актива. Это некоторая условная величина, к примеру, выбранная, равной $(C^{A_{0,t}} + C^{B_{0,t}}) / 2$.

Рассматриваются торговые стратегии, при которых инвестор совершает сделки купли и продажи в течение текущей сессии, но к моменту её окончания позицию закрывает ($m_{\tau_N}^+ = 0$). Предполагается, что по счёту инвестора в течение сессии не делается дополнительных внешних вложений в оборотные средства или их изъятие. Тогда доход инвестора к окончанию сессии, т.е. по итогам последней биржевой авторизации τ_N , составит разница между оборотными средствами на его счёте после сделки в точке τ_N и его оборотными средствами к началу сессии:

$$I_{\tau_N}^+ = Q_{\tau_N}^+ - Q_{\tau_0}^-. \quad (4)$$

Моменты формирования заявок инвестором и их атрибуты могут определяться как внешними факторами, так и внутренними, т.е. биржевой динамикой. В рассматриваемом случае это только внутренние факторы. В общем виде стратегию, зависящую только от внутренней динамики торгов, можно выразить формулой

$$S = \{U_{t_k} (P|_{\tau_0}^{t_k - \eta_k})\}_{t_0}^{t_k}. \quad (5)$$

Здесь, U_{t_k} – вектор-функция параметров заявки, формируемой инвестором согласно стратегии S в момент t_k , $P|_{\tau_0}^{t_k - \eta_k}$ – биржевые показатели, которые известны инвестору в момент t_k , включая информацию о его текущей позиции и его заявках (направление, объём, цена и т.п.), находящихся в стаканах или ожидающих авторизации.

Отметим, что в целях защиты от разорения в параметры стратегии целесообразно ввести максимальный объём корзины инвестора V^{\max} . Объём заявки U_{t_k} рассчитывается с учётом текущей позиции $m_{t_k}^-$, объёмов его более ранних ожидающих исполнения заявок и параметра V^{\max} . Кроме того, для стратегий, использующих лимитные заявки, в параметрах должно быть определено положение цены формируемой заявки относительно текущих значений C^{A_0} , C^{B_0} .

Инвестор стремится так выбрать стратегию S , чтобы, по возможности, максимизировать свой ожидаемый доход $I_{\tau_N}^+$. Если понимать поток заявок от всех участников рынка как вероятностный процесс, то цель инвестора можно записать как максимизацию математического ожидания

$$M(I_{\tau_N}^+(S)) \xrightarrow{S} \max. \quad (6)$$

3 Аппаратно-программный комплекс

В рамках проекта для разработки торговых стратегий и их практического использования был создан аппаратно-программный комплекс. Одна его часть – это собственно торговый робот, программа, инсталлированная на сервере пользователя и по каналам связи коммутированная с сервером биржи. Робот логирует (протоколирует) максимально полный объём информации о ходе торгов на биржевой площадке. Согласно этой информации и заложенному в него алгоритму, робот в моменты принятия решений t_k формирует ордера и передавал их на биржу, т. е. осуществлял торговлю.

Вторая часть комплекса – это имитационный блок. Его назначение – разработка, тестирование и настройка стратегий управления. Эта работа осуществлялась на полигоне настройки, составленном из последовательных по времени логов биржевых торгов. Это те логи, которые были сформированы биржевым торговым роботом, но адаптированы под тестируемую стратегию. Так, в них была оставлена лишь та часть информации, которая требовалась для исследуемой стратегии, и вся эта информация была соотнесена к моментам принятия решений t_k . Таким образом, исследователь работает с дискретной (по времени) моделью торговой сессии, т.е. с последовательностью моментов t_0, t_1, \dots, t_k . Величины отнесённые к некоторому моменту t_k образуют строку данных этой модели. Переход в модели от строки к строке – это временной шаг модели.

Тестирование стратегий на исторических данных опирается на предположение, что на некотором промежутке времени, следующем за логами, составляющими полигон настройки, эффективность стратегий остаётся близкой к той, которую они показывают на полигоне. Однако факторы, определяющие рынок, постепенно эволюционируют, поэтому при сравнении стратегий и коррекции параметров используемой на практике стратегии массив настроечных логов необходимо регулярно обновлять.

Основной инструмент имитационного блока – это виртуальный экземпляр робота. В модуль виртуального робота встраивается предназначенный для тестирования торговый алгоритм. Виртуальному роботу на вход подаются логи из полигона настройки. Робот, согласно встроенному в него алгоритму, идёт от шага к шагу по массиву логируемых данных и осуществляет виртуальную торговлю, формируя виртуальные ордера и рассчитывая показатели своей торговли, в том числе, текущие и итоговые виртуальные доходы. В процессе вычислений логи полигона модифицируются, дополняются виртуальными операциями, которые производятся виртуальным роботом.

Следует отметить, что наиболее сложным в имитации торгов является моделирование исполнимости формируемых виртуальным роботом лимитных заявок. Достижение абсолютной точности в решении этой задачи принципиально невозможно. Поведение участников рынка зависит от действий других его участников. Но на полигоне настройки имитационного комплекса, составленном из логов уже прошедших сессий, участники торгов не могут видеть виртуальные операции робота и, следовательно, реагировать на них. Поэтому модель торгов не учитывает влияния виртуальных операций робота на общий поток заявок. Кроме того, исполнение заявок зависит от лага времени между формированием ордера и его авторизацией, а это время плавающее и не поддаётся точному учёту. Приходится использовать приёмы, которые позволяют оценить исполнение заявок с удовлетворительной точностью, но только приближённо. Более подробно см. [3,4].

4. Торговые стратегии, использующие ИНС

Как отмечено выше, наличие описанного здесь имитационного комплекса даёт возможность исследовать и настраивать различные торговые стратегии. В рамках проекта использовались управления, имеющие следующую общую структуру. Из множества показателей биржевой динамики выбиралось некоторое их подмножество, вектор показателей \hat{P} . Биржевой робот, логируя все поступающие данные, в режиме реального времени строил пошаговую модель торгов, соответствующую используемому торговому алгоритму. Для каждого шага k модели рассчитывался

вектор \hat{P}_k и по его значениям вычислялась заданная функция $\Phi(\hat{P}_k)$. Сигналом для операции служил переход значения Φ через определённый барьер β . Так, сигналом для покупки актива служило совместное выполнение неравенств:

$$\Phi(\hat{P}_{k-1}) < \beta \text{ и } \Phi(\hat{P}_k) \geq \beta, \quad (7)$$

а для его продажи:

$$\Phi(\hat{P}_{k-1}) > \beta \text{ и } \Phi(\hat{P}_k) \leq \beta. \quad (8)$$

(Как и во всех других случаях, формирование заявки и её объём зависят не только от наличия сигнала, но и от текущей позиции робота, а также от присутствия в стаканах ранее созданных, но не полностью реализованных виртуальных заявок.)

Идея переложить выбор признаков Φ и барьеров β на ИНС выглядит привлекательной. Однако, такой подход требует серьёзной проработки. Процесс настройки весов ИНС предполагает большое число итераций. Если оценку текущих значений этих весов делать по используемой в проекте методике, то на каждой итерации это потребует "прогонки" по всему массиву логов полигона настройки. А это очень значительный объём вычислений. Процедура может оказаться слишком трудоёмкой. Гораздо более доступным для реализации выглядит изложенный ниже гибридный подход. В нём на ИНС возлагается только краткосрочный прогноз изменения цен, и этот прогноз используется как один из параметров сигналов. Для выбора остальных параметров управления применяется уже наработанная методика прогонки по полигону настройки.

Для обучения ИНС следует использовать отдельный обучающий полигон составленный из логов, сформированных роботом на реальных торгах. На нём должны настраиваться веса нейросети для прогноза с выбранным горизонтом. Понятно, что для разных горизонтов это будут разные веса.

Для настройки параметров торговой стратегии S должен использоваться другой массив логов, составляющих полигон настройки. Наметим несколько подходов к выбору и настройке параметров стратегии S с использованием ИНС-прогнозов биржевых цен. Во всех описываемых вариантах сигналом к формированию заявки служит нахождение прогнозной цены актива за барьером β . Пусть задан горизонт прогноза r . Тогда сигналом для покупки актива в момент t могут служить условия

$$\tilde{C}^{B_{0,t+r}} \geq C^{B_{0,t}} + \beta \text{ или } \tilde{C}^{A_{0,t+r}} \geq C^{A_{0,t}} + \beta \quad (9)$$

а для продажи актива условия

$$\tilde{C}^{B_{0,t+r}} \leq C^{B_{0,t}} - \beta \text{ или } \tilde{C}^{A_{0,t+r}} \leq C^{A_{0,t}} - \beta \quad (10)$$

Здесь $\tilde{C}^{A_{0,t+r}}$ и $\tilde{C}^{B_{0,t+r}}$ – ожидаемые значения цен лучших предложений при горизонте прогноза r . (Детали, как поступить в случае одновременного выполнения обоих неравенств пока опускаем.)

Вариант 1. Выбираем некоторое множество горизонтов прогноза r_1, r_2, \dots, r_k , кратных шагу модели. Настраиваем для них ИНС-прогноз. Последовательность $\{r_k\}$ могут составлять равномерно растущие величины или, к примеру, значения, растущие по степеням двойки. Для каждого из горизонтов задаётся таблица значений барьера β . При фиксированных горизонте и барьере делается прогон по полигону настройки, т.е. вычисляются виртуальные доходы всех сессий полигона при сигналах, заданных прогнозом и барьером согласно неравенствам 9, 10. Рассчитывается средний доход по всему множеству логов полигона.

На сетке из всех тестируемых значений горизонта и барьера выбирается пара с наибольшим значением среднего по полигону дохода.

Данный вариант управления кажется естественным и предсказуемым. Если прогноз от ИНС будет достаточно точен и сохранит свою достоверность на период до следующей коррекции, а стратегия покажет доход на полигоне настройки, то можно рассчитывать на получение дохода на практике. Следующие варианты носят эвристический характер. Заранее трудно судить, дадут ли они дополнительный доход по отношению к варианту 1 или нет. Но и их интересно протестировать.

Вариант 2. Допустим, согласно варианту 1 для управления выбраны предпочтительные горизонт и барьер, и на шаге t_k некоторой сессии m полигона настройки система не выдаёт сигнал для формирования заявки. Однако такой сигнал мог бы появиться на этом шаге при какой-то другой паре горизонт-барьер, отсеянной в варианте 1 при выборе наилучшей. Хотя в целом по полигону эта пара не показала себя как наиболее эффективная, но именно на этом шаге она может быть лучше, чем та,

которой было отдано предпочтение. Можно поступить следующим образом. Можно оставить в рассмотрении и отслеживать на каждом шаге все пары горизонт-барьер, для которых средний доход на настроечном полигоне был положительным. Тогда на каждом шаге t_k среди оставленных в рассмотрении пар ищем ту, которая даёт сигнал на заявку, и используем этот сигнал. Если таких пар несколько и сигналы для них разнонаправлены, то имеет смысл выбрать тот, который соответствует меньшему горизонту. Также имеет смысл учитывать прогноз с горизонтом в 1 шаг и, если он по направлению тренда противоположен выбираемому сигналу, то с заявкой подождать – есть шансы сформировать её в более выгодных условиях.

Варианты 3, 4. На обучающем полигоне можно статистическими методами оценить разброс отклонений прогнозных значений изменения цен от реальных. (Понятно, что эти отклонения будут тем больше, чем больше тренд цены и горизонт прогноза.) Предположим, ошибка прогноза моделируется нормальным распределением и для каждого вектора признаков, индуцирующих прогноз, мы умеем оценить его дисперсию. Тогда для защиты от рисков нежелательного отклонения будущих значений цен от прогнозных варианты 1 и 2 можно модифицировать следующим образом. В неравенствах 9, 10 вместо прогнозного значения цены можно использовать границу доверительного интервала для этой цены при некоторой заданной вероятности α . Тогда прогнозные величины $\tilde{C}^{A_{0,t+r}}$ и $\tilde{C}^{B_{0,t+r}}$ заменяются на следующие:

$$\tilde{C}^{B_{0,t+r}^{\min}}(\alpha) = C : \text{Вер}[C^{B_{0,t+r}} < C] = \alpha, \quad (11)$$

$$\tilde{C}^{A_{0,t+r}^{\min}}(\alpha) = C : \text{Вер}[C^{A_{0,t+r}} < C] = \alpha, \quad (12)$$

$$\tilde{C}^{B_{0,t+r}^{\max}}(\alpha) = C : \text{Вер}[C^{B_{0,t+r}} > C] = \alpha, \quad (13)$$

$$\tilde{C}^{A_{0,t+r}^{\max}}(\alpha) = C : \text{Вер}[C^{A_{0,t+r}} > C] = \alpha. \quad (14)$$

В этом случае формулы 9, 10 примут следующий вид:

$$\tilde{C}^{B_{0,t+r}^{\min}}(\alpha) \geq C^{B_{0,t}} + \beta \quad \text{или} \quad \tilde{C}^{A_{0,t+r}^{\min}}(\alpha) \geq C^{A_{0,t}} + \beta \quad (9')$$

$$\tilde{C}^{B_{0,t+r}^{\max}}(\alpha) \leq C^{B_{0,t}} - \beta \quad \text{или} \quad \tilde{C}^{A_{0,t+r}^{\max}}(\alpha) \leq C^{A_{0,t}} - \beta \quad (10')$$

Заключение

Как представляется, при наличии прогноза от ИНС формирование торговой стратегии посредством имитационного комплекса, не составляет принципиальной трудности. Проблему составляет получение эффективного прогноза динамики цен, основанного только на внутренней истории. Есть сомнения в перспективности таких прогнозов даже при малых горизонтах. Технология формирования стратегий, описанная в работах 4, 5 обходит эту проблему, не используя прогнозы цен напрямую. В них от сигналов требуется лишь способность более-менее удачно "угадать" наступление тренда цен и то, будет ли он достаточным, чтобы компенсировать операционные издержки. Если удастся получить успешные стратегии, базирующихся на прогнозе, то в теоретическом плане это послужит обоснованием осмысленности подобных прогнозов. Дальнейшим развитием подхода могло бы стать включение в параметры, формирующие прогноз, показателей динамики цен на смежных торговых площадках.

Литература

1. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.: цв. ил. ISBN 978-5-97060-618-6
2. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
3. Джордж Ф. Люгер. Стратегии и методы решения сложных проблем/ пер. с англ. – 4-е изд., – М.: Изд. дом "Вильямс", 2003. – 864 с. ISBN 5-8459-0437-4
4. Gasanov I.I., Ereshko Ant.F. Overview of the Software Complex for High-Frequency Exchange Trading on the Stock Market// IEEE Xplore Digital Library. 14th International Conference on «Management of Large-Scale System Development» (MLSD'2021), Moscow, Russia, 2021. – Pp. 1–4.
5. Гасанов И.И., Ерешко Ан.Ф. Программный комплекс для высокочастотной биржевой торговли // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2021. Труды четырнадцатой международной конференции. М.: ИПУ РАН, 2021 (27-29 сентября 2021 года, Москва, Россия). С. – 405–413.