

Моделирование и оптимизация систем автоматической торговли финансовыми инструментами



Д. Д. Имаев,
инженер



Д. Х. Имаев,
д. т. н., профессор
damir.imaev@mail.ru

Кафедра автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

С позиций системного анализа и принципов управления в технических системах обсуждаются вопросы алгоритмизации и математического моделирования систем торговли финансовыми инструментами. Даны примеры компьютерной имитации сеансов торговли с использованием генератора книги ордеров, а также параметрической оптимизации нескольких модификаций алгоритма принятия решений о транзакциях по критериям максимизации прибыли и минимизации риска.

Ключевые слова: финансовый инструмент, торговля, алгоритм, автоматизация, моделирование, оптимизация.

Введение

За последние два десятилетия автоматизация торговли финансовыми инструментами получила бурное развитие и обрела популярность, как в финансовых, так и в технических и академических кругах [1, 2]. Интерес к этой области обусловлен рядом экономических и технических факторов:

- глобализация экономики, что отразилось на многообразии финансовых инструментов, увеличении объемов и сложности перемещения финансовых потоков;
- рост темпов автоматизации промышленности, который усиливает особую роль финансов как ресурса, распределением и перемещением которого необходимо эффективно управлять;
- бурное развитие сферы услуг, например, в области телекоммуникаций, что привело к появлению новых видов экономической и финансовой активности;
- развитие информационных технологий и вычислительных мощностей (возросшие скорости и объемы передачи информации, развитие Internet-технологий), создавшее условия реализации новых методов обработки информации и принятия решений на основе анализа данных.

Перечисленные факторы привели к резкому росту объемов и сложности финансовых транзакций. Ручное управление объектами, обладающими многообразием и сложностью поведения, затруднено, следовательно, необходима автоматизация принятия решений и компьютеризация проведения транзакций. Попытки

привлечения технических средств для решения задач торговли предпринимались относительно давно. Так, Н. Дж. Бальсара [3] еще в 1992 г. предложил общее определение: механическая торговая система (МТС) — это набор правил, определяющих вход и выход из торговли. Необходимость автоматизации процесса торговли привела к следующему этапу — появлению автоматической торговой системы (АТС), способной самостоятельно открывать и закрывать торговые позиции в реальном времени. Основным ее отличием от МТС является наличие механизма, который отвечает за доставку торгового приказа на биржу или на торговую платформу брокера, что дает возможность вести торговлю без непосредственного участия человека [1]. Так, на сегодняшний день, более 80% транзакций на крупнейших биржах мира производятся вычислительными системами — системами алгоритмической торговли [4].

В [5] неформально перечисляются важнейшие условия, которые необходимо учитывать при разработке АТС. Наиболее актуальна классификация по типам используемой информации и характеру причинно-следственных связей. В сверхбыстрых алгоритмах используются данные, которые относятся к краткосрочной микроструктуре рынка и техническим характеристикам информационных потоков и торговых систем. Механизм ценообразования и рыночных взаимодействий рассматривается как некоторая динамическая система с определенными свойствами, связь которых с чисто экономическими факторами не суть важна. Как отмечается в [1], «при торговле автоматиче-

скими торговыми системами, особенно в течение дня, на первое место выходит не перспективность инструмента рынка, а его ликвидность и волатильность».

Появилась необходимость оптимизации транзакций, так как в условиях больших объемов даже незначительная оптимизация решений приводит к существенным финансовым выигрышам. Необходимость в разработке математического описания таких процессов обусловила рост интереса к микроструктуре финансовых потоков как потоков информации и их внутренним свойствам. Это привело к обширному и повсеместному использованию методов финансового анализа.

Постановки задач разработки АТС аналогичны формулировкам многих технических задач в области оптимизации и управления. Возрос интерес к методам из других областей науки и техники: моделирование сложных объектов, оптимальное, адаптивное, стохастическое управление в технических системах; системы автоматизированной обработки информации и анализа данных. Если ввести формальные определения понятий риска, потерь и др., выбрать для них шкалы количественных оценок и установить характер взаимосвязей, то, в принципе, можно строить математические модели АТС и ставить задачи разработки методов их оптимизации и адаптации к изменениям характеристик рынков. Это приводит к идее о возможности решения задач автоматизации торговли известными и модифицированными методами классической и современной теории управления [6-10].

Сложность создания АТС обусловлена несколькими факторами.

1. Фрагментация и неоднородность информационных потоков. Существует множество рынков (бирж), которые часто конкурируют друг с другом и различаются техническими характеристиками (скорость, пропускная способность, надежность, вероятность успешной транзакции), а также финансовыми характеристиками (стоимость). Это расширяет пространство возможных действий (решений), повышает его размерность — ко времени, стоимости, объему добавляется «место» транзакции.
2. Повышенные требования к надежности системы. Сбой, как правило, приводит к немедленным финансовым потерям.
3. Повышенные требования к скорости принятия решения. Принцип «время — деньги» реализуется в этой области наиболее точно. В особенности, это относится к высокочастотным алгоритмам, где информативность сигналов быстро снижается со временем.
4. Повышенные требования к качеству и скорости каналов передачи информации. Как и информационные сигналы, управляющие сигналы (ордера на покупку или продажу) должны передаваться быстро и надежно.

Можно указать на два основных подхода к разработке алгоритмов принятия решений о транзакциях:

- 1 — анализ следствий, т. е. последовательности данных о цене инструмента («технический анализ» микроструктуры) для прогноза;
- 2 — анализ причин, формирующих цену, и связей «фактор—цена».

Перспективность второго подхода определяется тем, что причина наступает раньше следствия, а успешность подхода зависит от принципиальной возможности получения информации о факторах, формирующих цену, и степени корреляции будущей цены финансового инструмента с этими факторами.

Целью статьи является обсуждение вопросов алгоритмизации, математического моделирования и параметрической оптимизации систем автоматической торговли финансовыми инструментами с позиций системного анализа и принципов управления в технических системах.

Моделирование торговых систем

Моделирование торговой системы, как любого сложного объекта исследований, связано с декомпозицией — ее расчленением на взаимодействующие части. «Правильная» структуризация описания не только объясняет механизмы функционирования торговой системы, но также является предпосылкой для предсказания путей ее совершенствования.

Выделим две подсистемы рынка: А — формирования цен; В — спроса/предложения (рис. 1). Наибольший интерес представляют цена и механизм ее формирования, так как цена определяет стоимость транзакций (подсистема А). Природа влияния цены на спрос и предложение (подсистема В) многообразна из-за сильного влияния среды, неопределенности целей и особенностей участников торговли.

Торговый алгоритм и рынок образуют систему с обратной связью. Для ее изучения примем ряд допущений:

- контур причинно-следственных связей «торговый алгоритм—рынок» разомкнут — предполагается, что факт совершения операции не меняет ситуацию на рынке;
- в любой момент времени в течение всего периода торговли цены покупки и продажи имеют ненулевые значения, т. е. на рынке всегда присутствуют покупатели или продавцы;
- реализованная цена операции равна наблюдаемой, а также реальной рыночной цене на момент принятия решения, т. е. нет задержек;
- на операции не налагается стоимость.

Так мы определяем «идеальный» рынок с «бесконечной глубиной» и без «трения».

Принят информационно-алгоритмический подход к исследованиям — части модели, а также торговая система в целом рассматриваются как алгоритмы обработки данных. Это означает причинно-следственный характер моделей процесса торговли, а базовыми понятиями являются данные и алгоритмы.

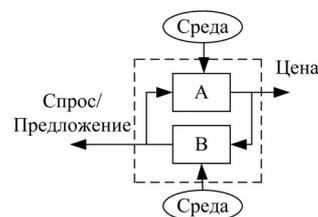


Рис. 1. Структура рынка

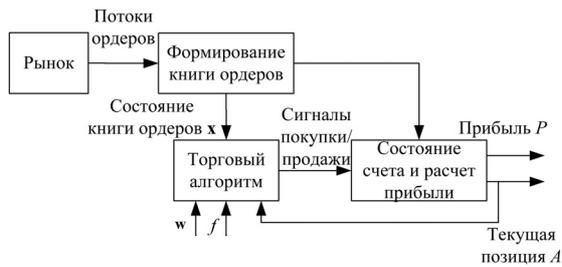


Рис. 2. Структура торговой системы

При описании торговой системы в соответствии с принципом последовательного раскрытия неопределенности [11] можно выделить следующие уровни (ранги неопределенности).

0 – модель нулевого ранга неопределенности $M(0)$ задается перечислением элементов базового множества: а – данных X ; б – алгоритмов W . По терминологии теории графов модель $M(0)$ представляет нуль-граф. Эта наименее информативная модель предопределяется обособлением объекта исследований из среды функционирования, а также выбором существенных для последующих исследований факторов.

1 – модель торговой системы первого ранга $M(1)$ получается при дополнении модели $M(0)$ информацией о связях между элементами базового множества, что означает задание структуры системы (топологии). Универсальный язык описания структур – это графы [12]. Математически, граф определяется как отношение на множестве:

G -граф – отношение R на множестве данных X

$$G = \langle X, R \rangle;$$

C -граф-схема – отношение Q на множестве алгоритмов W

$$C = \langle W, Q \rangle.$$

Принятый информационно-алгоритмический подход предопределяет причинно-следственный характер модели и, тем самым, несимметричность отношения. Ориентированные графы описывают структуру причинно-следственных отношений. На рис. 2 изображена диаграмма ориентированного C -графа торговой системы на множестве подсистем. Вершинам графа соответствуют алгоритмы генерирования и обработки данных

$W = \{\text{Рынок, Формирование книги ордеров, Торговый алгоритм, Расчет прибыли}\}.$

Дугам графа отвечают данные:

$Q = \{(\text{Формирование книги ордеров, Рынок}), (\text{Торговый алгоритм, Формирование книги ордеров}), (\text{Расчет прибыли, Формирование книги ордеров}), (\text{Торговый алгоритм, Расчет прибыли})\}.$

Модель первого ранга неопределенности $M(1)$ – концептуальная модель торговой системы – отношение на множестве понятий «данные» и «алгоритмы». В силу допущения о независимости состояния рынка от транзакций описание разомкнутого взаимодействия

«Среда – торговая система – среда» дополнено подсистемой – «Рынок (имитатор)» и приемниками данных «Прибыль» и «Текущая позиция» (трейдер/брокер/инвестор).

2 – дальнейшее раскрытие неопределенности достигается дополнением модели $M(1)$ информацией о структурах алгоритмов обработки данных. Модели второго ранга $M(2)$ позволяют систематизировать и перечислять существующие и потенциально возможные алгоритмы, позволяющие извлекать из доступных «сырых» данных дополнительную информацию для принятия решений.

3 – полностью определенные модели третьего ранга $M(3)$ получаются в результате конкретизации параметров алгоритмов. Это наиболее информативный уровень модели, на котором производится количественный анализ и оптимизация алгоритма: выбор и обсуждение значений порога принятия решений f , весов ценовых уровней w , глубина книги ордеров l и др. (см. рис. 2).

Алгоритм «торговый робот»

В алгоритме «торговый робот» естественно выделить подсистему принятия решения о совершении торговых операций в каждый момент времени, на входе которой – вектор состояния книги ордеров $x(i)$, параметры алгоритма, а также текущее состояние счета $A(i)$, а на выходе – сигналы на покупку и продажу $r(i)$. Также выделена подсистема состояния счета и подсчета прибыли со входом $r(i)$ и выходом – прибыль $P(i)$ и позиция $A(i)$.

Алгоритм запишется так (для краткости опущены индексы i):

1°. На каждом шаге i от 1 до конечного значения T :
 Если УСЛОВИЕ_ПОКУПКИ_НА_ОТКРЫТИЕ →
 Подать сигнал на покупку $r=1$
 Иначе, если УСЛОВИЕ_ПРОДАЖИ_ЗАКРЫТЬ →
 Подать сигнал на продажу $r=-1$
 Иначе, если УСЛОВИЕ_КОРОТКОЙ_ПРОДАЖИ →
 $r=-1$
 Иначе, если УСЛОВИЕ_ПОКУПКИ_ЗАКРЫТЬ →
 $r=1$.

Для алгоритма, предложенного в [13], условия совершения операций запишутся так (порог принятия решений f и глубина книги ордеров l – параметры алгоритма):

УСЛОВИЕ_ПОКУПКИ_НА_ОТКРЫТИЕ :

$$R_l(i) \geq f \text{ и } A(i)=0$$

УСЛОВИЕ_КОРОТКОЙ_ПРОДАЖИ :

$$R_l(i) \leq -f \text{ и } A(i)=0$$

УСЛОВИЕ_ПОКУПКИ_ЗАКРЫТЬ :

$$R_l(i) \geq f \text{ и } A(i)=1$$

УСЛОВИЕ_ПРОДАЖИ_ЗАКРЫТЬ :

$$R_l(i) \leq -f \text{ и } A(i)=1.$$

Блок «Состояние счета и расчет прибыли»:

1°. Начальное значение прибыли $P(0)=0$, позиция $A(0)=0$.

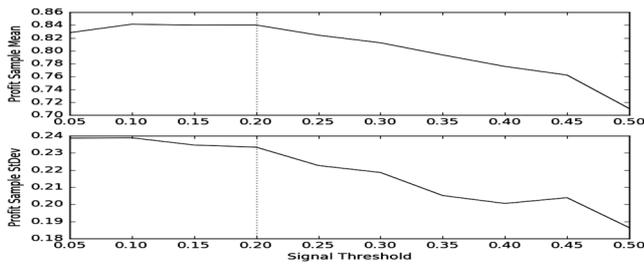


Рис. 3. МО и СКО прибыли для разных значений f при $l=5$

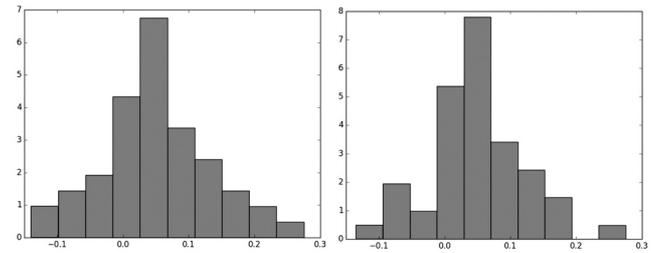


Рис. 4. Гистограмма выборки прибыли для $f=0,15, 0,25$ при $l=5$

2°. На каждом шаге i от 1 до конечного значения T :

Если $r = 1$ и $A=0 \rightarrow$

$A := 1,$

$pb :=$ взвешенная_сумма (p, pb)

иначе если $r = -1$ и $A = 1 \rightarrow$

$A := 0,$

$P := P+(p-pb)$

иначе если $r = -1$ и $A = 0 \rightarrow$

$A := -1,$

$pa :=$ взвешенная_сумма (p, pa)

иначе если $r = 1$ и $A = -1 \rightarrow$

$A := 0,$

$P = P+(pa-p)$

3°. Выход: конечное значение $P(T)$.

Параметрическая оптимизация алгоритма «торговый робот»

Далее исследуются результаты работы алгоритма «торговый робот» на реализациях генератора Стоикова [14], настроенного на динамику книги ордеров одного из инструментов на Токийской бирже.

В соответствии с моделью [14] книга ордеров представлена вектором $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_K(t))$, где $|x_p(t)|$ — число ордеров с ценой p ; K — некоторая максимально возможная цена. Значение $x_p(t) < 0$ соответствует $|x_p(t)|$ ордерам на покупку; $x_p(t) > 0$ соответствует $|x_p(t)|$ ордерам на продажу. Тогда цена спроса определяется как максимальная из цен ордеров покупки

$$p_B(t) = \max \{p: x_p(t) < 0\}; p = 1, \dots, K,$$

а цена предложения — как минимальная

$$p_A(t) = \min \{p: x_p(t) > 0\}; p = 1, \dots, K.$$

Под рыночной ценой $p(t)$ понимается среднее между ценами покупки и продажи.

Попытаемся «экспериментально» найти оптимальное значение порога f для выбранной глубины книги ордеров l . Параметры потока ордеров даны в [13], начальная цена 10,0 у. е.

Вычисляется функция дисбаланса

$$R_l(t) = \log((bd_l(t))/(ad_l(t))),$$

где «плотность покупки» bd_l — суммарное количество ордеров покупки на l соседних уровнях цены, начиная с наилучшей цены покупки $p_B(t)$, и «плотность продажи» ad_l — суммарное количество ордеров продажи на l соседних уровнях, начиная с $p_A(t)$. Отметим,

что для самого алгоритма, а также исследования его свойств, абсолютное значение и единица измерения цены p не важны; важна только разница между ценами для вычисления «прибыли», которую так же можно измерять в условных единицах. Для наглядности, в работе [13] и здесь p иногда выражается в реальных единицах некоторой валюты, но возможно просто измерять цену как целое число, выражающее номер «ценового уровня».

Для оптимизации параметров необходимо выбрать показатели качества алгоритма, например, оценки $M_l(f)$ и $S_l(f)$ — среднего и СКО прибыли $P_l(f)$. В [13] рассматривается максимизация интегрального критерия $I_l(f) = M_l(f) - \alpha S_l(f)$, где α — степень чувствительности к риску.

В процессе компьютерного эксперимента фиксируются значения прибыли P , полученной на выборке из 50 реализаций генератора книги ордеров. Каждая реализация состоит из двух временных рядов в моменты времени от 1 до 200: цена на рынке и значение функций дисбаланса R_p .

Оцениваются показатели $M_l(f)$ и $S_l(f)$ для значений порога f в диапазоне от 0,05 до 0,5. Графики зависимости $M_5(f)$ и $S_5(f)$ при глубине $l=5$ книги ордеров представлены на рис. 3.

На рис. 4. представлены гистограммы распределения прибыли для значений $f = 0,15$ и $0,25$, которые позволяют утверждать, что прибыль имеет симметричное распределение.

Оптимальное значение f , максимизирующее $I(f)$, меняется в зависимости от чувствительности к риску α (рис. 5).

Модификации алгоритма «торговый робот»

Модификация алгоритма 1: вклад взвешенных уровней цены. В [13] плотность книги ордеров определялась как простая сумма чисел ордеров на соседних ценовых уровнях, т. е. вклад каждого уровня в значение плотности был одинаковым. Введем определение взвешенной плотности книги, в котором ценовые уровни имеют различный вклад:

$$bd_l = \sum_{i=1}^l w_i b_i, ad_l = \sum_{i=1}^l w_i a_i, \sum_{i=1}^l w_i = 1,$$

где l — число рассматриваемых уровней; b_i — число ордеров покупки на уровне i ; a_i — число ордеров продажи на уровне i ; и $\mathbf{w} = (w_1 w_2 \dots w_l)$ — вектор весов. Примем, что большие индексы весов отвечают большему расстоянию от цены рынка, w_1 соответствует уровню $p_B(t)$ и $p_A(t)$.

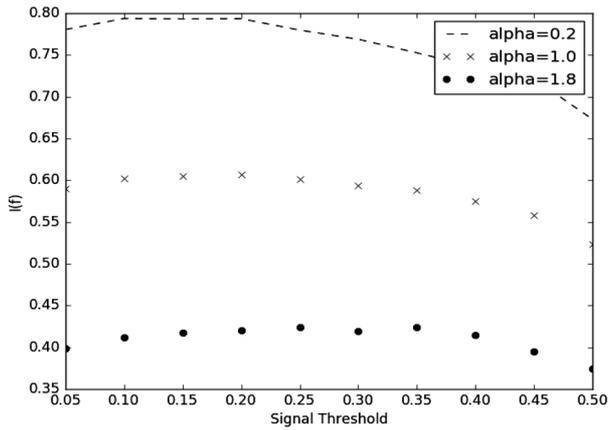


Рис. 5. Зависимость $I(f)$ для $\alpha=0,2, 1,0, 1,8$ и $l=5$

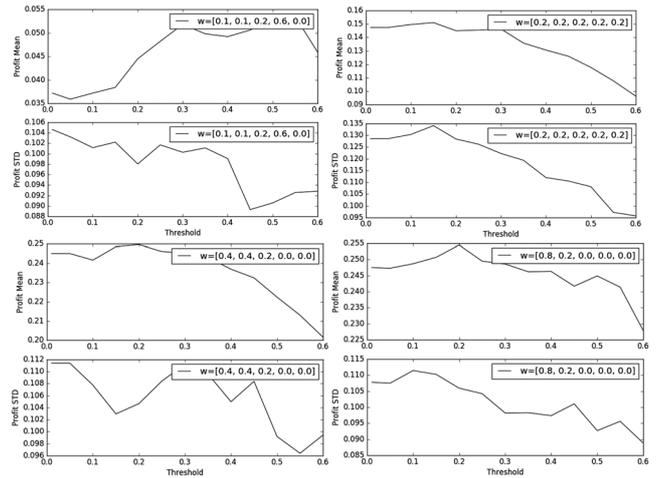


Рис. 6. M и S прибыли для разных порогов f и весовых векторов w при $T=200$

Напрашивается вопрос, как зависят среднее M и СКО S прибыли от параметров алгоритма f, w и периода фиксации прибыли T , если предположить, что вклад уровней в значение плотности различный, т. е. варьируется вектор весов w . Может ли оказаться, что ближайшие к рыночной цене уровни более значимы, и соответствующие им значения весов должны быть выше?

Рассмотрим некоторый набор векторов весов, составленных в порядке возрастания влияния пяти уровней, ближайших к рынку. Для краткости, векторы с большим вкладом уровней в «глубине» книги будем называть меньшими, а векторы с большими элементами для уровней ближе к рыночной цене — большими. На рис. 6 представлены примеры зависимости M и S от порога f для четырех значений w при $T=200$.

По результатам многочисленных экспериментов с различными значениями вектора весов можно сделать несколько наблюдений и обобщений.

1. С изменением в сторону больших w средняя прибыль увеличивается, т. е. для максимизации прибыли предпочтительнее брать большие w .
2. Почти для любых w прибыль уменьшается с ростом f , что обобщает наблюдения, приведенные в [13].
3. СКО остается примерно той же для всех значений f и w , изменяясь в пределах диапазона (0,08...0,12). Из этого можно сделать вывод, что фактором риска (т. е. СКО) в принятии решения о выборе оптимальных значений f и w можно пренебречь.
4. Для вырожденных случаев наименьшего и наибольшего w описанные выше зависимости нарушаются. Для малого w это, по-видимому, связано с тем, что малые w соответствуют уровням, отдаленным от рынка, и информативность сигнала снижена. В таких условиях более высокие значения f , соответствующие меньшему количеству операций (т. е. большей «осторожности»), могут быть предпочтительнее. Наибольший вектор w использует только один уровень, что негативно сказывается на информативности сигнала.

Модификация алгоритма 2: избыточное условие спреда. Спред — разница между наилучшими ценами продажи $p_A(t)$ и покупки $p_B(t)$. По построению случайных процессов, формирующих книгу, существует

взаимосвязь между спредом и параметрами этих процессов. Добавление фактора спреда может оказаться как избыточным, так и усилить алгоритм путем приближения к некоторому условному «оптимальному» набору правил, аналитический путь получения которого нам неизвестен. Для проверки этого внесем дополнительный элемент в правила открытия новых позиций: необходимо, чтобы спред был больше некоторого порогового значения C . Обозначая временной ряд значений спреда как D , получим следующие торговые правила:

УСЛОВИЕ_ПОКУПКИ_НА_ОТКРЫТИЕ :

$$R_I(i) \geq f \text{ и } D(i) \geq C \text{ и } A(i) = 0$$

УСЛОВИЕ_КОРОТКОЙ_ПРОДАЖИ :

$$R_I(i) \leq -f \text{ и } D(i) \geq C \text{ и } A(i) = 0.$$

Проводя аналогичные предыдущему пункту испытания, получаем результаты, выборочно приведенные на рис. 7.

Принятое условие значительно сокращает ожидаемую прибыль при незначительном уменьшении неопределенности. Эффект можно объяснить тем, что дополнительное условие не повышает качества принятых решений, а только сокращает их частоту — прибыль сокращается в N раз потому, что одинаковые по своему результату действия принимаются в N раз реже.

Модификация алгоритма 3: использование данных на прошлых шагах. Попробуем усилить условия открытия позиций, используя память — предыдущие значения цен $p_B(t)$ и $p_A(t)$. Пусть мы хотим открывать длинную позицию (покупать), когда, как и раньше, сигнал $R_I(i) \geq f$, при этом цена покупки не убывает: $p_B(i) \geq p_B(i-1)$, а цена продажи строго растет: $p_A(i) > p_A(i-1)$. Примем симметричные условия для открытия коротких позиций (продажи): цена падает по сравнению со значениями на предыдущем шаге.

УСЛОВИЕ_ПОКУПКИ_НА_ОТКРЫТИЕ :

$$R_I(i) \geq f \text{ и } p_B(i) \geq p_B(i-1) \text{ и } p_A(i) > p_A(i-1) \text{ и } A(i) = 0$$

УСЛОВИЕ_КОРОТКОЙ_ПРОДАЖИ :

$$R_I(i) \leq -f \text{ и } p_B(i) < p_B(i-1) \text{ и } p_A(i) \leq p_A(i-1) \text{ и } A(i) = 0.$$

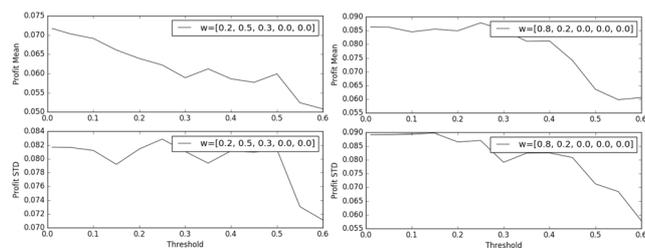


Рис. 7. M и S прибыли для разных порогов f и весовых векторов w для модификации 2

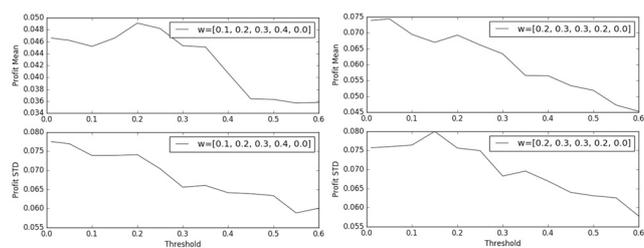


Рис. 8. M и S прибыли для различных порогов f и весовых векторов w модификации 3

Условия на закрытие позиций оставим прежними. Выборочные результаты приведены на рис. 8.

В данном случае не удается подобрать комбинацию условий, дающую лучшие результаты; наблюдаются эффекты, схожие с результатами модифицированного алгоритма 2.

Отметим, что форма зависимости статистических характеристик прибыли остается одинаковой при рассмотренных вариантах торгового алгоритма. Для максимизации прибыли предпочтительнее брать большие w , и малые f , при этом риском можно пренебречь.

Заключение

Как отмечается в [1], «торговые роботы — следующий эволюционный этап развития автоматической торговли, продукт информационных технологий и новой экономики». Значение, сложность и применение автоматических торговых систем будет возрастать с развитием финансовых рынков. В то же время, данная прикладная область, опираясь на достижения информационных технологий, в свою очередь дает толчок к развитию технических средств и переосмыслению широкого круга технических дисциплин.

Рассмотренные уровни детализации концептуальной модели торговой системы в соответствии с принципом последовательного раскрытия неопределенности позволяют наметить пути усовершенствования систем и создают предпосылки для развития методологии, моделей и методов разработки систем автоматической торговли финансовыми инструментами.

1. На уровне топологии информационных связей (ранг модели 1): учет дополнительной информации и новых связей между блоками, торговой системой и средой и др.; адаптация алгоритмов к нестационарности потоков ордеров и поиск оптимальных значений f и w в онлайн-режиме с введением обратных связей по различным выходам; применение систем искусственного интеллекта и машинного обучения, где в качестве новых блоков могут быть введены имитаторы среды, наблюдатели и др. При таких модификациях существенно изменятся качественные характеристики системы.
2. К вариациям на уровне структур алгоритмов (ранг модели 2) относятся: нахождение альтернативных, ослабленных условий для закрытия позиции, поскольку «быстрая фиксация прибыли» может не являться оптимальной стратегией; исследование модификаций алгоритмов, при которых позиция продолжает увеличиваться, если этого диктуют

условия рынка («повышение ставки»), т. е. операции покупки и продажи не обязательно строго чередуются.

Список использованных источников

1. Торговые системы-роботы на рынке ценных бумаг. РБКМ: торговые роботы. 2012. <http://rbkm.ru/biblioteka/roboti-i-mts/torgovie-sistemi-roboti-na-rinke-tsennich-bumag>.
2. Механические торговые системы. РБКМ: торговые роботы. 2012. <http://rbkm.ru/biblioteka/roboti-i-mts/mechanicheskie-torgovie-sistemi>.
3. N. J. Balsara. Money Management Strategies for Futures Traders// Wiley, 1st edition, March 16, 1992. P. 151.
4. M. Glantz, R. Kissell. Multi-Asset Risk Modeling: Techniques for a Global Economy in an Electronic and Algorithmic Trading Era// Academic Press, Dec 3, 2013. P. 258.
5. Разработка торговой системы. РБКМ: торговые роботы. 2012. <http://rbkm.ru/biblioteka/roboti-i-mts/razrabotka-torgovoy-sistemi>.
6. S. Sethi, G. L. Thompson. Applications of Mathematical Control Theory to Finance: Modeling Simple Dynamic Cash Balance Problems//Journal of Financial and Quantitative Analysis, 5, 1970. P. 381-394.
7. W. H. Fleming. Optimal Investment Models and Risk-Sensitive Stochastic Control//IMA Volume of Mathematical Finance, 65, 1995. P. 35-45.
8. W. H. Fleming, T. Pang. An Application of Stochastic Control Theory to Financial Economics//SIAM Journal on Control and Optimization, 43, 2003. P. 502-531.
9. D. Borden. Stochastic Control Theory and Automated Market Making //Columbia University. 2010. http://www.columbia.edu/cu/cap/pdf-files/Borden_D_CAP_2010.pdf.
10. B. R. Barmish. Can Control Science Bring New Insights to Stock Trading Research?//IEEE – Control System Society. 2013. <http://www.ieeeccs-oll.org/lecture/can-control-science-bring-new-insights-stock-trading-research-0>.
11. А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. С. 238.
12. Ф. Харари. Теория графов. М.: «МИР», 1973. С. 300.
13. Д. Х. Имаев, Д. Д. Имаев. О некоторых свойствах случайных процессов, порождаемых дисбалансом потоков финансовых ордеров//Сб. докл. XIX Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM-2016, Санкт-Петербург, 25-26 мая 2016 г. Т. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. С. 295-298.
14. S. Stoikov, R. Talreja, R. Cont. A stochastic model for order book dynamics//Operations Research.Vol 58. No 3. 2010. P. 549-563.

Modeling and Optimization of Automated Trading Systems

D. D. Imaev, engineer. **D. H. Imaev**, Doctor of Technical Sciences, professor. (Department of Automation and Control Processes, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»)

The article discusses automated trading systems modeling and trading algorithm structure from the perspective of system analysis and automated control principles. We consider various modifications of a specific trading algorithm implementation and offer ways of its parametric optimization with performance criteria based on profit expectations and risk tolerance. The article demonstrates examples of the algorithm simulation using order book generator.

Keywords: trading system, algorithmic trading, automation, modeling, optimization.