Прогнозирование спроса на логистические услуги с помощью цепей Маркова

Никишов С.И., к.т.н., доцент кафедры системного анализа и информатики, доцент, Институт экономики, математики и информационных технологий, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена задача моделирования случайных процессов для прогнозирования спроса на логистические услуги на основе теории цепей Маркова. Применение данной модели позволит автоматизировать экспертные функции и развить концепцию адаптивно-интегрированной логистики.

Ключевые слова: адаптивно-интегрированная логистика, прогнозирование спроса на логистические услуги, цепи Маркова, теория случайных процессов.

Forecasting demand for logistics services using Markov chains

Nikishov S.I., PhD, Institute of Economics, Mathematics and Information Technology, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

Annotation. The article considers the task of modeling random processes to predict the demand for logistics services based on the theory of Markov chains. The use of this model will automate expert functions and develop the concept of adaptively integrated logistics.

Keywords: adaptively integrated logistics, forecasting demand for logistics services, Markov chains, random process theory.

Введение

Развитие современной логистики тесно связано с развитием информационных технологий, которые позволяют применять новейшие алгоритмы для повышения эффективности логистических процессов. При этом сам факт наличия информационной системы не является конкурентным преимуществом. Как говорил в свое время Николас Карр, применение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) не дает предприятию никакого конкурентного преимущества, что ИКТ для предприятия это такая же обеспечивающая инженерная инфраструктура, как, например, водопровод [5].

Развитие национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации» предполагает его финансирование в размере 1635 млрд. руб., основными целями которого являются создание надежной информационно-коммуникационной инфраструктуры с высокоскоростными каналами связи и развитие отечественного программного обеспечения [7]. Согласно отчету аналитического агентства tadviser и Госкорпорации Ростех рынок промышленного интернета вещей к 2020 году составит 270 млрд руб. [4]. Промышленный интернет вещей включает в себя промышленные контроллеры и датчики для обеспечения удаленного и автоматического управления промышленным оборудованием.

Для устранения дефицита пропускной способности интернет-каналов крупнейшие провайдеры сотовой связи реализуют программу по развитию технологии связи поколения 5G, которая будет превышать по скорости в 10-100 раз каналы связи LTE. Повышенная пропускная способность интернет-каналов позволит объединить территориально удаленное оборудование и обеспечить сбор информации от перемещающегося груза и транспорта без задержек.

Одной из важнейших проблем при выполнении прогнозов является неопределенность развития событий. Для качественного прогнозирования спроса на логистические услуги необходимо обладать актуальной и проверенной информацией, экспертными знаниями в предметной области и иметь необходимые навыки и опыт. В случае, когда такую задачу приходится решать

довольно часто, но с постоянно изменяющимися условиями, то необходимо данную задачу автоматизировать. Автоматизация экспертных функций всегда является крайне непростой задачей. Автоматизировать знания эксперта, его опыт и интуицию бывает крайне сложно, а иногда и невозможно. В данном случае необходима разработка специализированного программного обеспечения, способного решать подобные задачи с применением технологий искусственного интеллекта [1].

Прогнозирование на основе теории случайных процессов

Теория случайных процессов – это раздел теории вероятностей, изучающий закономерности случайных явлений в динамике их развития. Случайные процессы описываются переменными состояния, которые могут быть как дискретными, так и непрерывными и классифицируются по двум показателям – времени и состоянию. Если происходит случайное изменение в некоторый момент времени, то процесс будет являться дискретным. При наличии зависимости смены состояний от времени речь будет идти о процессе с непрерывным временем.

Поскольку время и состояние могут быть как дискретными, так и непрерывными, то в результате была получена следующая классификация:

1. Дискретное состояние и дискретное время;
2. Дискретное состояние, непрерывное время;
3. Непрерывное состояние, дискретное время;
4. Непрерывное состояние непрерывное время [3].

В научной и учебной литературе применяется несколько формулировок случайного процесса, однако самой распространенной является эта:

«*Случайным процессом X(t) называется процесс, значение которого при любом значении аргумента t является случайной величиной*» [6]

Случайный процесс может быть записан в виде функции двух переменных:

$$X(t)=\varphi(t, \omega),\ \omega \in \Omega,\ t \in T,\ X(t) \in I,$$

где ω – единичное событие,

Ω − пространство событий,

T – область значений аргумента t функции X(t),

I – множество возможных значений случайного процесса X(t) [6].

Широкое применение в теории случайных процессов получили марковские случайные процессы с дискретными состояниями. Теория марковских цепей относительно проста и понятна, и без особых сложностей поддается алгоритмизации и программированию.

Если протекающий в системе процесс имеет состояния S_1, S_2, S_3, …, которые зависят только от текущего состояния и не зависят от предыдущего, то такой процесс называется марковским.

Применение цепей Маркова для моделирования спроса на логистические услуги

Теория цепей Маркова позволяет описать случайный процесс на основе только текущего состояния без учета истории перехода. Распределение будущих состояний также зависит только от текущего. Другими словами, можно сказать, что марковское событие не имеет эффекта памяти. Практически любое анализируемое событие можно рассматривать как марковское, если наделить его марковским свойством, то есть не учитывать историю перехода в это состояние [2, 9].

Рассмотрим в качестве примера ситуацию с заключением логистической сделки между одним клиентом и двумя поставщиками. Дискретный характер состояний будет означать, что история заключения предыдущих сделок никак не влияет на заключение будущих. Смена состояний происходит в случайные моменты времени. Размещение заказов клиента может распределяться между поставщиками, либо заказ может быть отдан целиков одному из поставщиков. Отношения между участниками сделки могут быть описаны графически в виде графа (см. рисунок 1).

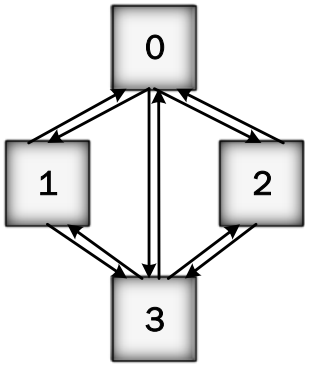

Рис. 1 – Граф состояний заключения логистической сделки с двумя поставщиками

Каждый блок данного графа означает состояние процесса. Состояние 0 означает, что клиент не разместил ни одного заказа ни у одного из поставщиков. Состояние 1 означает полное размещение заказа у первого поставщика, состояние 2 – у второго, а состояние 3 – это размещение заказа сразу у обоих поставщиков двумя частями.

Если процесс не исключает одно событие при наступлении другого, то такая цепь называется ординарной. Стрелки означают направление отношения. В данном графе двойные стрелки означают двойную инициацию заказа. То есть клиент может сам разместить заказ у поставщика, а может сам поставщик сделать запрос клиенту.

Переменная λ означает вероятность заключения сделки или размещения заказа. При этом индекс означает направление связи. Например, λ_{01}, означает вероятность заключения сделки по инициативе клиента у поставщика №1, а λ_{10}, наоборот, инициацию сделки со стороны поставщика №1 (например, поставщик сам предложил клиенту некоторые особые условия, скидку, участие в программе лояльности и т.д.). Исходные значения вероятностей могут быть получены различными способами, например, как было описано в работе [8], с помощью нейронных сетей и нечёткой композиции, с помощью ретроспективного анализа или методом экспертных оценок. Отсутствующая связь обозначается в соответствующей позиции матрицы в виде нуля. В результате из исходного графа отношений одного клиента и двух поставщиков получится следующая матрица состояний:

$$P = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ 1 & P_{10} & 0 & 0 & P_{13} \\ 2 & P_{20} & 0 & 0 & P_{23} \\ 3 & P_{30} & P_{31} & P_{32} & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Согласно правилу марковских событий (2), сумма каждой строки равна единице. При условии, что клиент может вообще не заключать никаких сделок и оставаться в этом состоянии сколь угодно долго, то сумма вероятностей по строке гарантированно будет равен единице (см. Формула 2).

$$\sum_{j=1}^{k} P_{ij} = 1,\ i=1, 2, .. k \quad (2)$$

Составим матрицу состояний для графа, приведенного на рисунке 1.

$$P = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0{,}6 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 1 & 0{,}1 & 0 & 0 & 0{,}9 \\ 2 & 0{,}2 & 0 & 0 & 0{,}8 \\ 3 & 0{,}5 & 0{,}25 & 0{,}25 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

В тех позициях, где у графа нет связей, в матрице на соответствующих позициях вероятности будут равны нулю. Поскольку индексы указывают также и направление, то если между состояниями связь отсутствует полностью, то нулей в матрице будет два.

Выполним прогноз на несколько периодов вперед, основываясь только на текущем состоянии системы. Чтобы выполнить прогноз на второй период, необходимо использовать следующую формулу:

$$P_{n1}(2) = P_{nj} \cdot P_{j1} \quad (4)$$

После подстановки в эту формулу исходных матриц, получим:

$$\mathrm{P}(2) = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0{,}6 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 1 & 0{,}1 & 0 & 0 & 0{,}9 \\ 2 & 0{,}2 & 0 & 0 & 0{,}8 \\ 3 & 0{,}5 & 0{,}25 & 0{,}25 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0{,}6 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 1 & 0{,}1 & 0 & 0 & 0{,}9 \\ 2 & 0{,}2 & 0 & 0 & 0{,}8 \\ 3 & 0{,}5 & 0{,}25 & 0{,}25 & 0 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0{,}2 & 0{,}05 & 0{,}05 & 0{,}7 \\ 1 & 0{,}45 & 0{,}285 & 0{,}245 & 0{,}02 \\ 2 & 0{,}4 & 0{,}32 & 0{,}24 & 0{,}04 \\ 3 & 0{,}075 & 0{,}3 & 0{,}1 & 0{,}525 \end{pmatrix}$$

Для прогнозирования третьего периода следует воспользоваться той же формулой (4). То есть для получения матрицы состояний на третий период, необходимо перемножить матрицы состояний первого и второго периодов.

После перемножения матриц получим:

$$P(3) = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0{,}365 & 0{,}295 & 0{,}215 & 0{,}125 \\ 1 & 0{,}0875 & 0{,}275 & 0{,}095 & 0{,}5425 \\ 2 & 0{,}1 & 0{,}25 & 0{,}09 & 0{,}56 \\ 3 & 0{,}3125 & 0{,}17625 & 0{,}14625 & 0{,}365 \end{pmatrix}$$

При переходе в следующее состояние марковская цепь «забывает» предыдущее состояние. Исходя из этого свойства марковские цепи приобретают одну интересную особенность – через некоторое количество последовательных прогнозов, матрица состояний стабилизируется. Для данной задачи это происходит на шестом шаге.

$$P(6) = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0{,}241078763 & 0{,}239001 & 0{,}142556 & 0{,}377364 \\ 1 & 0{,}241092418 & 0{,}238986 & 0{,}142556 & 0{,}377366 \\ 2 & 0{,}241094714 & 0{,}238986 & 0{,}142557 & 0{,}377362 \\ 3 & 0{,}241094256 & 0{,}238996 & 0{,}14256 & 0{,}377349 \end{pmatrix}$$

Анализируя данную особенность, можно сделать вывод, что на основе данной модели нельзя делать долгосрочные прогнозы.

Рассмотрим далее ситуацию с одним клиентом и тремя поставщиками. Граф состояний в этом случае ощутимо усложнится и будет выглядеть как на рисунке 2.

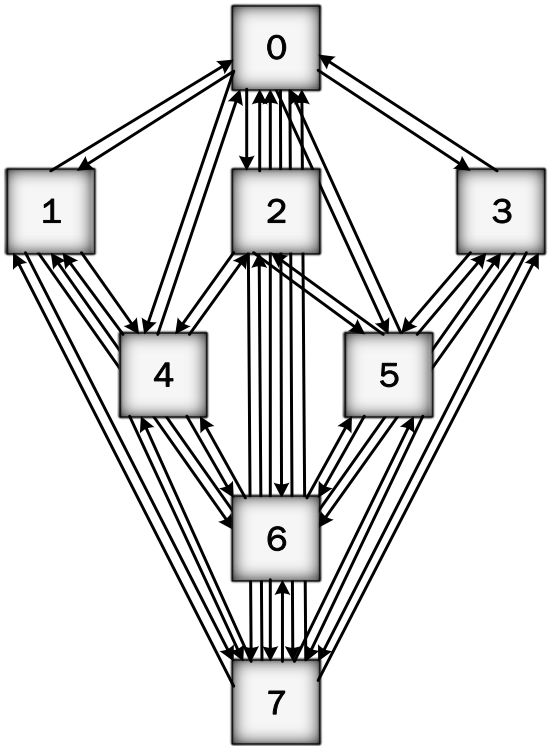

Рис. 2 – Граф состояний для одного клиента и трех поставщиков

Используя аналогичный принцип формирования матриц, получим:

$$P=\begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 0 & P_{01} & P_{02} & P_{03} & P_{04} & P_{05} & P_{06} & P_{07} \\ 1 & P_{10} & 0 & 0 & 0 & P_{14} & 0 & P_{16} & P_{17} \\ 2 & P_{20} & 0 & 0 & 0 & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} \\ 3 & P_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{35} & P_{36} & P_{37} \\ 4 & P_{40} & P_{41} & P_{42} & 0 & 0 & 0 & P_{46} & P_{47} \\ 5 & P_{50} & 0 & P_{52} & P_{53} & 0 & 0 & P_{56} & P_{57} \\ 6 & P_{60} & P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & 0 & P_{67} \\ 7 & P_{70} & P_{71} & P_{72} & P_{73} & P_{74} & P_{75} & P_{76} & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

При комбинировании состояний заключения сделки (размещения заказа) получим следующий набор комбинаций: 0 – это отсутствие заказов, состояние 1 – это полное размещение заказа у первого поставщика, 2 – весь заказа у второго поставщика, 3 – весь заказ у третьего поставщика, 4 – разделение заказа между первым и вторым поставщиком, 5 – разделение заказа между вторым и третьим поставщиком, 6 – между первым и третьим и 7 – распределение заказа между

всеми тремя поставщиками в некоторых пропорциях. Данный граф не содержит горизонтальных связей, что означает невозможность заключения заказа от имени клиента одним поставщиком у другого.

Поскольку в данном алгоритме изменяется только размерность матриц, то дальнейшие вычисления не приводятся.

При плавном изменении состояний во времени, например, когда состояние заказов носит распределённый по времени характер, то вместо вероятностей необходимо использовать экспоненциальные функции распределения вероятностей по времени:

$$P_{i,j}=f(t)=\lambda e^{-\lambda t}, \qquad (6)$$

где λ – вероятность наступления события;

t – время.

Такая марковская цепь будет называться неоднородной и теперь, чтобы найти состояния системы в определенный момент времени, необходимо решить систему дифференциальных уравнений Колмогорова.

Для одного клиента и двух поставщиков (см граф на Рисунке 1) система уравнений будет описывать непрерывный поток событий и может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt}=\lambda_{20}P_2(t)+\lambda_{10}P_1(t)-\lambda_{01}P_1(t)-\lambda_{02}P_2(t) \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt}=\lambda_{01}P_0(t)+\lambda_{13}P_1(t)-\lambda_{10}P_1(t)-\lambda_{13}P_1(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt}=\lambda_{02}P_0(t)+\lambda_{32}P_3(t)-\lambda_{20}P_2(t)-\lambda_{23}P_2(t) \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt}=\lambda_{13}P_1(t)+\lambda_{23}P_2(t)-\lambda_{31}P_3(t)-\lambda_{32}P_3(t) \end{cases} \qquad (7)$$

Для этого уравнения также справедливо правило, что сумма всех вероятностей событий равна единице: $p_0(t)+p_1(t)+p_2(t)+p_3(t)=1$

При увеличении количества участников сделок сложность уравнений будет возрастать, что потребует существенных вычислительных мощностей и сеть Маркова может не подойти для решения данной задачи. В этом случае более подходящими могут оказаться другие методы, имеющие природу марковских

цепей, например, метод динамики средних или имитационное моделирование.

Теория случайных процессов и, в частности, теория цепей Маркова, позволяет выполнить прогноз поведения системы, основываясь только на ее текущем состоянии без учета истории предыдущих изменений состояний.

Заключение

Для обеспечения качественной информационной поддержки логистического провайдера крайне желательно автоматизировать функции более высокого уровня, чем обычная операционная деятельность. Автоматизация экспертных функций является крайне сложной задачей и требует использования соответствующих алгоритмов и моделей. Предложенная модель является одним из компонентов адаптивно-интегрированной концепции логистики, который позволит автоматизировать функцию прогнозирования спроса для построения глобальных цепей поставок и позволит своевременно реагировать на изменение активности поставщиков и конкурентов.

Библиографический список

1. Брынцев, А.Н. Инвестиции и логистическая инфраструктура в современных условиях / А.Н. Брынцев. – 2018. – С. 18–22.

2. Бухарбаева, Л.Я. Прогнозирование спроса и управление цепью поставок в логистической среде товарно-производственных комплексов [Электронный ресурс] / Л.Я. Бухарбаева, Д.В. Филиппов, Д.П. Брусиловский // Вестник Челябинского государственного университета. – 2009. – № 3 – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-sprosa-i-upravlenie-tsepyu-postavok-v-logisticheskoy-srede-tovarno-proizvodstvennyh-kompleksov (дата обращения: 11.08.2019).

3. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания. / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – Москва: ЛКИ, 2011.

4. Искусственный интеллект (рынок России) [Электронный ресурс] // TAdviser.ru. – 2018. – URL:

http://www.tadviser.ru/Статья:Искусственный_интеллект_(рынок_России) (дата обращения: 03.10.2018).

5. Карр, Н. Блеск и нищета информационных технологий: Почему ИТ не являются конкурентным преимуществом. [Электронный ресурс] / Н. Карр. – Москва: Секрет фирмы, 2005. – 176 с. – URL: https://www.labirint.ru/books/79328/ (дата обращения: 03.10.2018).

6. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика.: Золотой фонд российских учебников / Н.Ш. Кремер. – 3 перераб. и доп. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 551 с.

7. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». – Правительство России [Электронный ресурс]. – URL: http://government.ru/rugovclassifier/614/events/ (дата обращения: 25.06.2019).

8. Никишов, С.И. Применение нечеткой композиции для моделирования логистических потоков / Вопросы инновационной экономики. – 2017. – № 3. – Издательство «Креативная экономика» [Электронный ресурс] / С.И. Никишов. – 2017. – URL: https://creativeconomy.ru/lib/38197 (дата обращения: 06.10.2017).

9. Прохоров, А.В. Маркова цепь. Большая российская энциклопедия. гл. ред. Ю.С. Осипов: в 35 т. / А.В. Прохоров. – Москва, 2004.

References

1. Bryntsev, A.N. Investments and logistic infrastructure in modern conditions / A.N. Bryntsev. – 2018. – P. 18-22.

2. Bukharbaev, L.Ya. Demand forecasting and supply chain management in the logistics environment of commodity-production complexes [Electronic resource] / L.Ya. Bukharbaev, D.V. Filippov, D.P. Brusilovsky // Bulletin of the Chelyabinsk State University. – 2009. – № 3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-sprosa-i-upravlenie-tsepyu-postavok-v-logisticheskoy-srede-tovarno-proizvodstvennyh-kompleksov (accessed date: 11.08. 2019).

3. Gnedenko, B.V. Introduction to queuing theory. / B.V. Gnedenko, I.N. Kovalenko. – Moscow: LCI, 2011.

4. Artificial intelligence (Russian market) [Electronic resource] // TAdviser.ru. – 2018. – URL: http://www.tadviser.ru/Article: Artificial_intelligence_ (market of Russia) (date of treatment: 03.10.2018).

5. Carr, N. The shine and soverty of information technology: Why IT is not a competitive advantage. [Electronic resource] / N. Carr. – Moscow: The secret of the company, 2005. – 176 p. – URL: https://www.labirint.ru/books/79328/ (accessed: 10/03/2018). 6. Kremer, N.Sh. Probability Theory and Mathematical Statistics: Golden Fund of Russian Textbooks / N.Sh. Kremer. – 3 rev. and add. – Moscow: UNITY-DANA, 2010. – 551 p.

7. The national program «Digital Economy of the Russian Federation». – Government of Russia [Electronic resource]. – URL: http://government.ru/rugovclassifier/614/events/ (accessed: 06/25/2019).

8. Nikishov, S.I. The use of fuzzy composition for modeling logistics flows / Issues of innovative economy. – 2017. – № 3. – Publishing House «Creative Economy» [Electronic resource] / S.I. Nikishov. – 2017. – URL: https://creativeconomy.ru/lib/38197 (date of access: 06.10.2017).

9. Prokhorov, A.V. Markov chain. Great Russian Encyclopedia. ch. ed. Yu.S. Osipov: in 35 tons / A.V. Prokhorov. – Moscow, 2004.