

А.А. Мухарёв, С.С. Кубрин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЕДИНИЦ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ (КАРЬЕР, ПОРТ, БУРОВАЯ ПЛАТФОРМА) ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Описан способ прогнозирования траекторий перемещений транспортных производственных единиц в стесненных условиях (карьер, порт, буровая платформа). Эта задача актуальна в настоящее время, так как современный уровень развития техники позволяет выполнять такое прогнозирование с высокой точностью и учетом маневрирования объектов. Современные системы позиционирования позволяют получать точные координаты объектов, универсальная автоматическая информационная система дает возможность передавать данные всем участникам движения в режиме реального времени, а с помощью полиномиальной адаптивной модели прогнозирования возможен расчет прогнозов траекторий и определение наличия опасности чрезмерного сближения.

Ключевые слова: транспортировка грузов, безопасность транспортировки, автоматическая информационная система, глобальная навигационная спутниковая система, высокоточное позиционирование, траектория движения, прогнозирование, адаптивная полиномиальная модель.

Одной из важнейших проблем современной транспортировки грузов с использованием крупных транспортных единиц, таких как крупнотоннажные суда и самосвалы, является обеспечение безопасности движения в стесненных условиях и районах с интенсивным транспортным потоком.

В последнее время, учитывая особую значимость данной проблемы, принимаются существенные меры, направленные на повышение безопасности движения, особенно в ограниченном

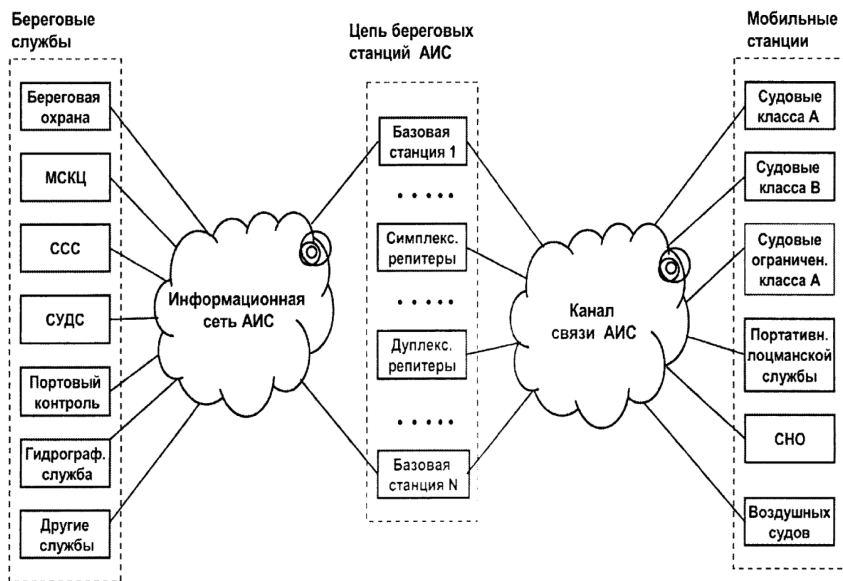
пространстве. Развитие спутниковой навигации и повышение точности позиционирования создало предпосылки к разработке высокоточных способов определения траектории транспортной единицы вплоть до положения оконечностей корпуса. Однако, несмотря на потенциальную возможность, на сегодняшний день не в полной мере разработаны модели расчета траекторий движения как самого объекта, так и перемещение всего корпуса и его оконечностей. Поэтому задача разработки таких моделей весьма актуальна.

Управление большегрузным транспортом имеет особенность, заключающуюся в том, что реакция на управляющее воздействие оператором (водителем, штурманом) происходит со значительной задержкой по времени. Чем больше масса транспортного средства, тем больше времени требуется на совершения маневра. Это время складывается из времени реакции и принятия решения оператором, времени исполнения механизмами команд оператора и времени взаимодействия средств управления со внешней средой для выполнения маневра транспортным средством (поворот, остановка и пр.). Время реакции водителя на опасность столкновения и время принятия решения для совершения маневра уклонения не велико и при небольших скоростях перемещения большегрузных самосвалов можно не учитывать. На судах этот период времени существенно возрастает из-за большей неопределенности расположения траекторий движения своего и встречного объектов, по сравнению с автомобильным транспортом, который перемещается по фиксированным маршрутам (дорогам). С увеличением размеров и грузоподъемности транспортных средств возросло время на исполнение механизмами управляющих воздействий. Это время определяется техническими характеристиками рулевого устройства (время перекладки пера руля, время перемещения на требуемый угол поворота колес), системы экстренного торможения (время, требуемое на реверс машины судна для остановки, время приведения тормозной системы самосвала в действие). После того, как механизмы управления произвели требуемые действия для выполнения маневра транспортному средству большой грузоподъемности потребуется значительное время и пространство для его совершения. Такие пространственные параметры определяются при эксплуатационных испытаниях и представлены в виде характеристик: длина тормозного пути (самосвалы), путь торможения (суда), радиус разворота (самосвалы), диаметр циркуляции (суда). Таким образом время на совершение маневра

уклонения большегрузных транспортных средств растет вместе с ростом их грузоподъемности. Наиболее важно на сегодняшний день сократить время на анализ и оценку ситуации сближения. Это возможно предоставлением оператору фактических данных об элементах и маршруте движения встречного транспортного средства. Такие решения заложены в автоматической информационной системе (АИС), внедряемой в настоящее время на судах. АИС (рис. 1) является информационно-технической системой, обеспечивающей автоматический обмен навигационной и иной информацией, связанной с безопасностью мореплавания, между судовыми и другими станциями АИС по специальному каналу радиосвязи. Использование аналогичной технологии технически возможно и целесообразно для обеспечения безопасности движения тяжелого карьерного крупногабаритного.

В состав АИС входят следующие основные компоненты:

- мобильные станции (транспондеры), устанавливаемые на судах, а также на других объектах;
- канал связи АИС, обеспечивающий обмен информацией между мобильными и береговыми станциями АИС;
- цепь береговых станций АИС, включающая базовые станции, симплексные и дуплексные репитеры;



Структура и основные компоненты АИС

- информационная сеть АИС, связывающая базовые станции АИС с береговыми службами;
- оборудование АИС, устанавливаемое в береговых службах (СУДС, системы судовых сообщений, береговая охрана, портовый контроль, МСКЦ, гидрографическая служба и другие).

Мобильные судовые станции АИС сопрягаются с навигационным приемником ГНСС/ДГНСС, гирокомпасом, датчиком угловой скорости, другими источниками информации, а также с одним или с несколькими навигационными дисплеями, где отображается информация АИС (РЛС/САРП, электронная картографическая система или навигационный комплекс). Кроме того, АИС активно взаимодействует с системами радионавигации и связи, такими как ГНСС (GPS/ГЛОНАСС), дифференциальные опорные станции и радиомаяки ДГНСС, система морской спутниковой связи Инмарсат-С.

Встроенный приемник ГНСС или ДГНСС обеспечивает временную синхронизацию аппаратуры АИС и является резервным источником информации о местоположении судна. Основным источником информации о местоположении судна в АИС является внешний судовой приемник ГНСС или ДГНСС, используемый в навигационных целях и сопрягаемый с АИС. Дифференциальные поправки, передаваемые береговыми опорными станциями ДГНСС в радиомаячном диапазоне, могут транслироваться от внешнего приемника ДГНСС во внутренний приемник ГНСС. Дифференциальные поправки могут также передаваться по каналу связи АИС, приниматься судовой аппаратурой АИС и транслироваться во внутренний и внешний приемники ГНСС.

АИС решает следующие частные задачи:

- безопасное расхождение судов;
- определение местоположения и параметров движения судна;
- опознание (идентификацию) судна или объекта.

АИС должна выполнять следующие функции:

- автоматически предоставлять идентификацию о судне (тип, местоположение, курс, скорость, эксплуатационное состояние и т.д.);
- автоматически принимать указанную информацию от других судов;
- вести сопровождение наблюдаемых судов;
- обмениваться данными с береговыми постами управления.

Необходимость удовлетворения повышенных требований к точности позиционирования потребовала в ряде случаев раз-

работки принципиально новых систем радионавигации. Это касается в первую очередь:

- обеспечения безопасности движения в стесненных условиях;
- управления движением судов;
- обеспечения проведения специальных работ в исключительной экономической зоне.

Сначала за рубежом, а потом и у нас в стране была создана дифференциальная подсистема среднеорбитных спутниковых навигационных систем (ДГНСС).

В табл. 1 приведены обобщенные эксплуатационные требования к дифференциальной подсистеме ГНСС.

Под доступностью в таблице понимается процент времени готовности системы. Погрешность определения координат места судна (с вероятностью 95%) при совместном использовании СНС ГЛОНАСС и GPS с дифференциальными поправками составляет от 1 до 2 м. Относительное позиционирование с использованием фазовых измерений дает погрешность измерений до нескольких сантиметров.

Располагая точной информацией о координатах и параметрах движения объектов, АИС может рассчитать дистанцию и время кратчайшего сближения $D_{кр}$ и $T_{кр}$. Но ограничением расчетов является предположение о неизменности направления и скорости движения объектов. Таким образом, возникает задача прогнозирования параметров кратчайшего сближения объектов с учетом возможности их маневрирования. При этом предполагается решить задачу прогнозирования траектории движе-

Таблица 1

Эксплуатационные требования к морской дифференциальной подсистеме

Характеристики подсистемы	Порты и подходы	УДС	Координирование СНО	Экономическая зона
Погрешность (с $P = 0,95$), м	8–20	10	5–10	1
Рабочая зона, км	20	не определена	20	200 миль
Доступность	0,997	0,999	0,95	0,95
Время подачи сигнала предупреждения, с	6–10	6–10	–	–

ния объектов для оперативной оценки эффективности управления их движением.

Воспользуемся адаптивными методами прогнозирования. Считается, что характерной чертой адаптивных методов прогнозирования является их способность непрерывно учитывать эволюцию динамических характеристик изучаемых процессов, «подстраиваться» под эту эволюцию, придавая, в частности, тем больший вес и тем более высокую информационную ценность имеющимся наблюдениям, чем ближе они к текущему моменту прогнозирования. Общее значение термина заключается, по-видимому, в том, что «адаптивное» прогнозирование позволяет обновлять прогнозы с минимальной задержкой и с помощью относительно несложных математических процедур.

Простейший вариант метода метод экспоненциального сглаживания. Постановка задачи прогнозирования с использованием простейшего варианта метода экспоненциального сглаживания формулируется следующим образом.

Пусть анализируемый временной ряд y_τ , $\tau = 1, 2, \dots, t$ представлен в виде:

$$y_\tau = a_0 + \varepsilon_\tau \quad (1)$$

где a_0 – неизвестный параметр, не зависящий от времени; ε_τ – случайный остаток со средним значением, равным нулю, и конечной дисперсией.

Понятие экспоненциальной средней можно обобщить в случае экспоненциальных средних более высоких порядков.

Выравнивание p -го порядка:

$$S_t^{(p)} = \alpha \cdot S_t^{(p-1)} + \beta \cdot S_{t-1}^{(p)} \quad (2)$$

является простым экспоненциальным сглаживанием, примененным к результатам сглаживания $(p-1)$ -го порядка. Если предполагается, что тренд некоторого процесса может быть описан полиномом степени n , то коэффициенты предсказывающего полинома могут быть вычислены через экспоненциальные средние соответствующих порядков. В случае, когда исследуемый процесс, состоящий из детерминированной и случайной компоненты, описывается полиномом n -го порядка, прогноз на τ шагов вперед осуществляется по формуле:

$$\hat{y}_\tau(t) = \hat{a}_1 + \hat{a}_2\tau + \frac{1}{2}\hat{a}_3\tau^2 + \dots + \frac{1}{n!}\hat{a}_{n+1}\tau^n \quad (3)$$

где $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_{n+1}$ – оценки параметров.

Фундаментальная теорема метода экспоненциального сглаживания и прогнозирования, впервые доказанная Р. Брауном и Р. Майером, говорит о том, что $(n+1)$ неизвестных коэффициентов полинома n -го порядка $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_{n+1}$ могут быть оценены с помощью линейных комбинаций экспоненциальных средних $S^{(i)}$, где $i = \frac{1}{n} + 1$.

Следовательно, задача сводится к вычислению экспоненциальных средних, порядок которых изменяется от 1 до $n + 1$, а затем через их линейные комбинации — к определению коэффициентов полинома.

На практике обычно используются полиномы не выше второго порядка. Например, при использовании полинома первого порядка адаптивная модель временного ряда имеет вид:

$$y_t = a_{1,t} + a_{2,t} + e_t \quad (4)$$

где $a_{1,t}$ — значение текущего t -го уровня; $a_{2,t}$ — значение текущего прироста.

В табл. 2 приведены формулы, необходимые для расчета по этим моделям.

Процедура прогнозирования экспоненциального сглаживания состоит из следующих этапов:

1. Выбирается вид модели экспоненциального сглаживания, задается значение параметра сглаживания a . При выборе порядка адаптивной полиномиальной модели могут использоваться различные подходы, например, графический анализ, метод изменения разностей и др.

2. Определяются начальные условия. Например, для полиномиальной модели первого порядка необходимо определить $\hat{a}_{1,0}, \hat{a}_{2,0}$.

Чаще всего в качестве этих оценок берут коэффициенты соответствующих полиномов, полученные методом наименьших квадратов. Начальные условия для модели нулевого порядка обычно получают усреднением нескольких первых уравнений ряда. Зная эти оценки, с помощью указанных в таблице формул находят начальные значения экспоненциальных средних.

3. Производится расчет значений соответствующих экспоненциальных средних.

4. Находятся оценки коэффициентов модели.

5. Осуществляется прогноз на одну точку вперед, находится отклонение фактического значения временного ряда от прогнозируемого. Шаги с 3 по 5 данной процедуры повторяются для всех $t \leq n$, где n — длина ряда.

Таблица 2

Основные формулы для прогнозирования по адаптивным полиномиальным моделям

Степень модели	Начальные условия	Экспоненциальные средние	Оценка коэффициентов	Модель прогноза
$n = 0$	$S_0^1 = \bar{a}_{1,0}$	$S_t^{(1)} = \alpha y_t + \beta S_{t-1}^{(1)}$	$\bar{a}_{1,t} = S_t^{(1)}$	$\hat{y}_\tau(t) = \bar{a}_{1,t}$
$n = 1$	$S_0^{(1)} = \bar{a}_{1,0} - \frac{\beta}{\alpha} \bar{a}_{2,0}$ $S_0^{(2)} = \bar{a}_{1,0} - \frac{2\beta}{\alpha} \bar{a}_{2,0}$	$S_t^{(1)} = \alpha y_t + \beta S_{t-1}^{(1)}$ $S_t^{(2)} = \alpha S_{t-1}^{(1)} + \beta S_{t-1}^{(2)}$	$\bar{a}_{1,t} = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)}$ $\bar{a}_{2,t} = \frac{\alpha}{\beta} (S_t^{(1)} - S_t^{(2)})$	$\hat{y}_\tau(t) = \bar{a}_{1,t} + \bar{a}_{2,t} \cdot \tau$
$n = 2$	$S_0^{(1)} = \bar{a}_{1,0} - \frac{\beta}{\alpha} \bar{a}_{2,0} + \frac{\beta(2-\alpha)}{2\alpha^2} \bar{a}_{3,0}$ $S_0^{(2)} = \bar{a}_{1,0} - \frac{2\beta}{\alpha} \bar{a}_{2,0} + \frac{\beta(3-2\alpha)}{\alpha^2} \bar{a}_{3,0}$ $S_0^{(3)} = \bar{a}_{1,0} - \frac{3\beta}{\alpha} \bar{a}_{2,0} + \frac{3\beta(4-3\alpha)}{2\alpha^2} \bar{a}_{3,0}$	$S_t^{(1)} = \alpha y_t + \beta S_{t-1}^{(1)}$ $S_t^{(2)} = \alpha S_{t-1}^{(1)} + \beta S_{t-1}^{(2)}$ $S_t^{(3)} = \alpha S_{t-1}^{(2)} + \beta S_{t-1}^{(3)}$	$\bar{a}_{1,t} = 3(S_t^{(1)} - S_t^{(2)}) + S_t^{(3)}$ $\bar{a}_{2,t} = \frac{\alpha}{2\beta^2} [(6-5\alpha)S_t^{(1)} - 2(5-4\alpha)S_t^{(2)} + (4-3\alpha)S_t^{(3)}]$ $\bar{a}_{3,t} = \frac{\alpha}{\beta^2} [S_t^{(1)} - 2S_t^{(2)} + S_t^{(3)}]$	$\hat{y}_\tau(t) = \bar{a}_{1,t} + \frac{1}{2} \tau^2 \bar{a}_{3,t} + \tau \cdot \bar{a}_{2,t}$

6. Окончательная прогнозная модель формируется на последнем шаге в момент $t = n$. Прогноз получается на базе выражения (3) путем подстановки в него последних значений коэффициентов и времени упреждения τ .

К положительным особенностям рассмотренных моделей следует отнести то, что при поступлении новой информации расчеты повторять не придется. Достаточно принять в качестве начальных условий последние значения функций сглаживания $S_t^{(i)}$ и продолжить вычисления.

Таким образом, можно спрогнозировать координаты и траектории объектов с учетом их маневрирования, рассчитать с помощью численных методов параметры кратчайшего сближения и оценить степень безопасности такого сближения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елисеева И. И., Юзбашев М. М.* Общая теория статистики: Учебник / Под ред. И. И. Елисеевой. 4-е изд., перераб. и доп). – М.: Финансы и статистика. – 2002. – 480 с.

2. Общая теория статистики: Учебник / Под ред. Р.А. Шмойловой. 3-е изд., перераб). – М.: Финансы и статистика. – 2002. – 560 с.

3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-е изд). – М.: Вильямс. – 2006. – 1104 с.

4. *Еремин Д. М., Гарицев И. Б.* Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления). – М.: МИРЭА. – 2004. – 75 с.

5. *Федунец Н. И., Кубрин С. С.* Основные направления развития новых информационных технологий на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ10. Информатизация и управление—1. 2008. – С. 21–29.

6. *Федунец Н. И., Кубрин С. С.* Развитие информационных технологий на горнодобывающих предприятиях // Горный журнал. – 2009. – № 1. – С. 83–85.

7. *Кубрин С. С., Гуральник С. Б., Гуральник Б. С.* Оценка рисков эксплуатации буровых платформ // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ5. 2012. – С. 194–201.

8. *Гуральник Б. С., Кубрин С. С., Гуральник С. Б.* Выявление опасностей для оценки рисков эксплуатации морских буровых платформ // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2012. – № 2. – С. 8. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Мухарёв Александр Александрович*¹ – инженер,
e-mail: sailorcat-00@mail.ru,

*Кубрин Сергей Сергеевич*¹ – доктор технических наук,
профессор, зав. лабораторией,
e-mail: skubrin@mail.ru,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

UDC 622.684:
656.61:
004:519.7

A.A. Mukharev, S.S. Kubrin

**FORECASTING TRACKS OF MOVEMENTS
OF TRANSPORT INDUSTRIAL UNITS
AT RESTRICTED CONDITIONS
(OPEN PIT, PORT, DRILLING RIG)
FOR SECURITY PROVISION**

The article describes a way to forecast tracks of movements of transport industrial units at restricted conditions (open pit, port, drilling rig). This problem is actual at present for present level of engineering allows to perform such a prediction with high accuracy taking into account maneuvering of objects. Modern positioning systems allow to obtain accurate coordinates of objects, universal automatic informational system gives way to transmit data to all objects of traffic in real time mode and it is possible to calculate track forecasts with polynomial adaptive forecast model and to check it for dangerous over-closing.

Key words: cargo transportation, safety of transportation, automatic informational system AIS, global navigation satellite system, high accuracy positioning, trajectory, forecasting, adaptive polynomial model.

AUTHORS

*Mukharev A.A.*¹, Engineer, e-mail: sailorcat-00@mail.ru,

*Kubrin S.S.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory,
e-mail: skubrin@mail.ru,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Eliseeva I. I., Yuzbashev M. M. *Obshchaya teoriya statistiki*: Uchebnik. Pod red. I. I. Eliseevoy. 4-e izd. (General statistics. Textbook. I. I. Eliseeva (Ed.), 4th edition), Moscow, Finansy i statistika, 2002, 480 p.
2. *Obshchaya teoriya statistiki*: Uchebnik. Pod red. R. A. Shmoylovoy. 3-e izd. (Общая теория статистики: Textbook. Shmoylova R. A. (Ed.), 3rd edition), Moscow, Finansy i statistika, 2002, 560 p.
3. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs. Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2-e izd. (Neuron networks: Complete course. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd edition), Moscow, Vil'yams, 2006, 1104 p.
4. Eremin D. M., Gartsev I. B. *Iskusstvennye neyronnye seti v intellektual'nykh sistemakh upravleniya* (Artificial neuron networks in the intelligent control systems), Moscow, MIREA, 2004, 75 p.
5. Fedunets N. I., Kubrin S. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special issue 10. Informatizatsiya i upravlenie—1. 2008, pp. 21–29.
6. Fedunets N. I., Kubrin S. S. *Gornyy zhurnal*. 2009, no 1, pp. 83–85.
7. Kubrin S. S., Gural'nik S. B., Gural'nik B. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special issue 5. 2012, pp. 194–201.
8. Gural'nik B. S., Kubrin S. S., Gural'nik S. B. *Vestnik Assotsiatsii burovykh podryadchikov*. 2012, no 2, pp. 8.

