

УДК 681.5

Ю. В. Ильюшин, И. М. Новожилов, М. Ю. Шестопапов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Методика и система управления позиционированием геологоразведочного подводного аппарата

*В современных условиях быстроразвивающегося рынка все большее значение приобретает качество производимой продукции. На качество продукции существенно влияет сырье, из которого оно производится. В данной статье ставится задача повышения качества добываемого сырья за счет разработки высокоскоростного алгоритма позиционирования подводной буровой платформы. Для реализации поставленной задачи предлагается методика расчета координат позиционирования подводного аппарата, осуществляющего геологоразведочные работы на большой глубине. Предлагается аппаратная реализация данного алгоритма в бортовой системе за счет модернизации вычислительного процессора ЦСП-1В577. В его блок управления добавляются дополнительные арифметико-логические устройства – создается микросхема «блок параллельных вычислений» (Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2015630036). В статье представлена ее компоновка, электронная разводка, монтажная плата и делается вывод о возможности применения данного устройства в других системах глобального позиционирования бортовых систем.*

### Системный анализ, управление, распределенные системы, алгоритм, буровые платформы

В современных геологоразведочных и буровых работах остро встает вопрос быстрого обмена информацией между всеми элементами системы. Тем самым существенно возрастает объем данных, обрабатываемых бортовыми ЭВМ. Это главным образом связано не только с отсутствием алгоритмического аппарата, осуществляющего распараллеливание базового линейного алгоритма, но и с физическим ограничением максимально возможного быстродействия обычных последовательных ЭВМ. Существующие необитаемые подводные аппараты (НПА) относятся к особому виду робототехнических систем с присущими данному виду функциональными и технологическими свойствами, составом систем и подсистем. При большом разнообразии существующих НПА единой классификации аппаратов до сих пор нет. В связи с этим в научных работах по данной тематике представлена достаточно разнящаяся информация [1].

Обзор научных работ в области НПА (как отечественных, так и зарубежных) позволил провести наиболее обобщенную классификацию аппаратов. В современной литературе НПА принято делить на 2 вида: неавтономные (ННПА) и автономные (АНПА). К ННПА относят аппараты, использующие кабель для управления и подачи

электроэнергии или буксируемые. Далее в группе ННПА будут рассматриваться, в основном, аппараты, имеющие движительную систему.

В отечественных научных публикациях и работах НПА с подобными техническими характеристиками называют подводными телеуправляемыми аппаратами (ПТА). Характерной особенностью ПТА является наличие кабель-связки между ПТА и пунктом управления (оператором). Кабель служит для энергообеспечения и телеуправления аппаратом. Самоходные НПА могут выполнять задачи на больших и малых глубинах, с различными типами движения.

АНПА представляют класс самоходных НПА с бортовыми источниками питания и беспроводными каналами управления и связи.

НПА, имеющие бортовые источники питания, но управляемые по кабелю телеуправления (волоконно-оптическая линия связи), входят в класс полуавтономных аппаратов.

Автономность НПА характеризуют такие качества, как наличие бортовой системы управления, бортовой системы позиционирования, наличие бортовых источников питания и при возможности – бортовой ЭВМ, осуществляющей логическое функционирование исходя из текущих условий и поставленных задач.

На данный момент самоходные НПА (СНПА) имеют в своем составе более 500 видов, различных по своему классу, автономности и т. д.

Лидирующие позиции в разработке таких аппаратов занимают Россия, Франция, Великобритания, Германия, США, Канада и Япония.

Разбиение неавтономных НПА на микро и мини уже долгое время используется в научных публикациях. Данные аппараты относятся к продуктам микросистемной техники и поэтому направлены на уменьшение массогабаритных характеристик бортовых систем. Условно такие аппараты можно разделить на следующие классы:

- а) микро (менее 5 кг);
- б) мини (масса 5...30 кг);
- в) легкие (30...500 кг);
- г) средние (500...5000 кг);
- д) тяжелые (более 5000 кг);

Такое деление чаще всего встречается в англоязычной литературе. В отечественной же литературе принято использовать деление по назначению.

Хотелось бы особо отметить обзорно-поисковые, геологоразведочные НПА, масса которых составляет не более 5 кг, а область работы – до 1 км. Их область применения наиболее широкая. Однако для геологоразведочных работ на более высоких глубинах их масса увеличивается до 100 кг. Типовой геологоразведочный аппарат имеет следующие технические характеристики:

- а) глубина погружения до 4000 м;
- б) радиус действия около 100...250 м;
- в) скорость хода 1...2.5 узла,
- г) масса от 20 до 250 кг.

Более востребованы геологоразведочные НПА среднего класса. В этот класс входят аппараты массой от 30 до 6000 кг.

Представителями донных НПА являются аппараты на гусеничном ходу. Такие аппараты предназначены для исследовательских, строительных и инженерных работ на морском дне. В мире насчитывается не более 65–70 НПА этого класса.

Наиболее используемыми в классе неавтономных НПА являются малогабаритные осмотровые аппараты. В зарубежных публикациях чаще всего представлены «Eyeball ROV». К 2000–2010 гг. было произведено 1200–1300 таких аппаратов. К настоящему времени в мире их было выпущено свыше 4500.

Преимущества ННПА по сравнению с АНПА:

а) большее время непрерывной работы (энергоснабжение НПА осуществляется по кабелю как с борта судна обеспечения, так и при помощи береговых источников питания);

б) выполнение задач, связанных с тяжелыми и сложными механическими работами в глубинах и на дне;

в) более простая конструкция, а следовательно, и более низкая стоимость продажи, разработки, эксплуатации;

г) отсутствие риска невозвращения аппарата после выполнения задачи.

Основные недостатки ННПА:

а) энергетическая зависимость от внешних источников питания;

б) ограниченный кабелем радиус действия;

в) необходимость установки на борту судна обеспечения устройства управления натяжением кабель-связки (во время волнения моря);

г) сложность управления аппаратом в сильных течениях и труднопроходимых местах.

Представленные недостатки, а также научно-технические достижения в разных областях (энергетики, электроники и информационных технологий и т. д.) форсировали развитие АНПА.

**Постановка задачи и ее решение.** Рассмотрим импульсную распределенную систему. Положим, что рассматриваемая система принадлежит к классу пространственно-инвариантных. Синтез системы управления будем проводить на основе стохастически эквивалентного алгоритма [1] придав ему идентифицирующие свойства.

Тогда система оценки будет выглядеть следующим образом:

$$J_{n+1}^i = M \left\{ \| (u_{n+1} - \hat{u}_{n+1}) \|_{\hat{Q}}^2 \right\} = \\ = \tilde{x}_n^T P_{A,n}^T \tilde{x}_n + u_n^T P_{B,n}^T u_n + 2u_n^T \hat{P}_n \tilde{x}_n + \text{tr}(QP_\varepsilon)$$

и бикритериальная целевая функция

$$J_{n+1} + \lambda J_{n+1}^I = \tilde{x}_n^T \tilde{A}_n^T Q \tilde{A}_n \tilde{x}_n + u_n^T B_n^T Q B_n u_n + \\ + 2\tilde{x}_n^T \hat{P}_{B,n} u_n + 2u_n^T \tilde{P}_n \tilde{x}_n + \text{tr}(QP_\varepsilon),$$

где  $\lambda$  – весовой множитель, задающий компромисс между процессами оценивания и управления;  $u_n$  – множитель Лагранжа;  $X_n$  –  $(s \cdot 1)$ -векторы состояний объекта;  $n$  – дискретный момент времени, компоненты которого  $X_{j,n}$ ,  $j = 1, 2, 3, 4, \dots, S$ ;  $M\{\cdot\}$  – символ математического ожидания;  $A, B$  ( $i = 1, 2, 3, 4, \dots, p$ ) –  $(S \cdot S)$ ,  $(S \cdot r)$ ,  $(S \cdot S)$  – мат-

рицы неизвестных параметров объекта и цели;  $Q$  – неотрицательный параметр, задающий требования к точности;  $u_n - (r-1)$ -вектор управляющих воздействий из множества  $U$  допустимых управлений, компоненты которого  $u_{k,n}$  ( $k = 1, 2, \dots, r$ );  $\tilde{x}_n^T = (x_n^T | x_n^{*T} | \dots | x_{n-p+1}^{*T}) - (S(p+1) + r) \cdot 1$ -вектор;  $\tilde{B}, \tilde{A} - 2s \cdot r$  и  $2s \cdot s(p+1)$  – составные матрицы движения;  $\omega_n$  и  $\xi_n - (s-1)$ -векторы возмущений;  $\hat{P}_B, \tilde{P}_n, P_\varepsilon$  – некоторые числа [2].

Минимизируя  $u_n$  получаем адаптивный алгоритм вида [1]–[4]

$$\bar{u}_n = -(\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n + R + \lambda \hat{P}_{B,n})^{-1} (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \lambda \tilde{P}_n) \tilde{x}_n,$$

где  $R$  – параметр, описывающий расстояние до цели. Можно показать, что существуют также значения весового параметра  $\lambda$ , при которых предлагаемый алгоритм превосходит по качеству управления стохастически эквивалентный закон. Для этого запишем очевидные соотношения [5]:

$$\begin{aligned} J_{n+1}(\hat{u}_n^*) - J_{n+1}(n) &= \tilde{x}_n^T \tilde{A}_n^T Q \tilde{B}_n \times \\ &\times (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R)^{-1} \beta_n (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R)^{-1} \times \\ &\times \tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n \tilde{X}_n - 2\tilde{x}_n^T (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \tilde{P}_n)^T \times \\ &\times (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R)^{-1} \tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n \tilde{X}_n - \\ &- X_n^T (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \lambda P_n)^{-T} (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R + \lambda P_n)^{-1} \times \\ &\times (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R + \lambda P_n) X_n (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \lambda P_n) + \\ &+ 2\tilde{x}_n^T (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \tilde{P}_n)^T (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n + R + \lambda P_n)^{-1} \times \\ &\times (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \lambda P_n) \tilde{X}_n = \tilde{x}_n^T \tilde{A}_n^T Q \tilde{B}_n \times \\ &\times (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R)^{-1} \beta_n (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n + R)^{-1} \times \\ &\times \tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n \tilde{X}_n - 2\tilde{x}_n^T (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \tilde{P}_n)^T \times \\ &\times \beta_n^{-1} \beta_n (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n u_n + R)^{-1} \tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n \tilde{X}_n - \\ &- \tilde{X}_n^T (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \lambda \tilde{P}_n)^{-T} (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n + R + \lambda P_n)^{-1} \times \\ &\times \beta_n (\tilde{B}_n^T Q \tilde{B}_n + R + \lambda P_n)^{-1} X_n (\tilde{B}_n^T Q \tilde{A}_n + \lambda P_n) = \\ &= \hat{u}_n^{*T} \beta_n \hat{u}_n^* - 2\hat{u}_n^{*T} \beta_n \tilde{u}_n^* - \hat{u}_n^{*T} \beta_n \tilde{u}_n + \\ &+ 2\hat{u}_n^{*T} \beta_n \tilde{u}_n + \hat{u}_n^{*T} \beta \tilde{u}_n - \hat{u}_n^{*T} \beta \tilde{u}_n = \\ &= \|\hat{u}_n^* - \tilde{u}_n\|_{\beta_n} - \|\hat{u}_n - \tilde{u}_n\|_{\beta_n} > 0, \end{aligned}$$

где  $\beta$  – некоторый вектор. Сформируем лагранжиан

$$L_{n+1} = J_{n+1} \left( \|\hat{u}_n^* - \tilde{u}_n\|_{\beta_n}^2 - \|\hat{u}_n - \tilde{u}_n\|_{\beta_n}^2 \right)$$

и оптимизируем его с помощью процедуры Зрроу–Гурвица–Удзавы. В результате несложных преобразований приходим к алгоритму

$$\begin{cases} u_n = (\lambda_n \beta_n + P_n)^{-1} (\lambda_n \beta_n \tilde{u}_n - \tilde{P}_n \tilde{X}_n), \\ \lambda_{n+1} = \lambda_n + \mu_{n+1} \left( \|\hat{u}_n - \tilde{u}_n\|_{\beta_n}^2 - \|\hat{u}_n^* - \tilde{u}_n\|_{\beta_n}^2 \right), \end{cases}$$

где  $\lambda_n$  – неотрицательный настраиваемый неопределенный множитель Лагранжа;  $u_n, \mu_{n+1}$  – длина шага градиентного поиска,  $[\lambda] = \max\{0, \lambda\}$ .

Эффективность алгоритма может быть повышена, если вычислительная мощность БЦВМ позволяет между двумя тактами реального времени  $n$  и  $n+1$  проводить расчеты в ускоренном масштабе времени. Так, если между  $n$  и  $n+1$  может быть сделано  $N$  итераций в ускоренном масштабе ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ), то целесообразно реализовать алгоритм в форме

$$\begin{cases} u_n(k) = -(\lambda'_n(k) B_n^T Q B_n + (1 + \lambda_n(k)) P_{B,n} + \\ + (\lambda'_n(k) + \lambda''_n(k)) R)^{-1} (\lambda'_n(k) B_n^T Q A_n + \\ + (1 + \lambda'_n(k)) P_n) x_n; \\ \lambda'_n(k+1) = \lambda'_n(k) + \mu'_{n+1}(k) (\hat{u}_n^T(k) R \tilde{u}_n(k) - p_n, \\ \lambda''_n(k+1) = \lambda''_n(k) + \mu''_{n+1}(k) \times \\ \times (\|\hat{u}_n^T(k) - \tilde{u}_n\|_{\beta_n}^2 - \|\hat{u}_n^* - \tilde{u}_n\|_{\beta_n}^2)_+. \end{cases}$$

Аналогичным образом можно учесть и другие формы ограничений как на управление, так и на переменные состояния.

В данном случае полученная функция показывает расчет трехмерного координатора. В связи с большим количеством входных воздействий, требуемых для реализации предлагаемого подхода, необходимо производить замер в достаточно большом числе точек. Это требует существенных затрат вычислительных ресурсов.

Для производства данного расчета предложен алгоритм распараллеливания вычислительных операций и одновременного решения множества задач. Его сущность заключается в разделении переменных по трем измерениям, как показано на рис. 1, и решении задачи методом параллельного расчета.

Сущность данного метода заключается в представлении функции в виде набора сегментов  $n$ , где  $n$  – член ряда Фурье. Из членов ряда Фурье формируется трехмерный куб, элементы которого впоследствии рассчитываются. Такой подход увеличивает скорость расчета за счет распараллеливания вычислительной процедуры. Однако для полноценной работы предложенного алгоритма необходимо создание микросхемы – контроллера управления, обеспечивающего работу параллельного алгоритма.

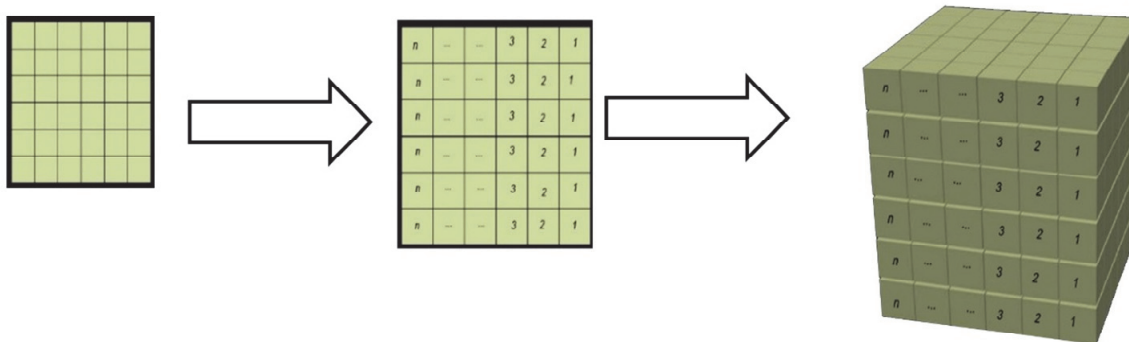


Рис. 1

Выбор функции				Выходные данные при активных высоких уровнях		
S3	S2	S1	S0	Логические функции	Арифметические операции	
					$C_n = B$ (без переноса)	$C_n = H$ (с переносом)
H	H	H	H	A	A	A + 1
H	H	H	B	A + B	A + B	(A + B) + 1
H	H	B	H	AB	A + B	(A + B) + 1
H	H	B	B	0	-1	0
H	B	H	H	AB	A + AB	A + (AB) + 1
H	B	H	B	B	(A + B) + AB	(A + B) + AB + 1
H	B	B	H	A(+ ) B	A-B-1	A-B
H	B	B	B	AB	AB-1	AB
B	H	H	H	A + B	A + AB	A + AB + 1
B	H	H	B	A + B	A + B	A + B + 1
B	H	B	H	B	(A + B) + AB	(A + B) + AB + 1
B	H	B	B	AB	AB-1	AB
B	B	H	H	1	A + A	A + A + 1
B	B	H	B	A + B	(A + B) + A	(A + B) + A + 1
B	B	B	H	A + B	(A + B) + A	(A + B) + A + 1
B	B	B	B	A	A-1	A

**Техническая реализация бортовой параллельной системы.** Техническая реализация бортовой параллельной системы осуществлена на основе вычислительного процессора ЦСП-1В577. Однако его использование ограничено ввиду необходимости дополнительной поддержки (установка элементов ОЗУ, интерпретаторов команд и т. д.). При рассмотрении объектов небольшого размера необходимо создание узкоспециализированной микросхемы, позволяющей производить параллельные вычисления на бортовых системах. Данная микросхема была реализована на базе микросхемы АЛУ 74181 (К555ИПЗ 4-разрядное скоростное АЛУ, выполняет либо 16 логических, либо 16 арифметических операций), в которую был последовательно интегрирован блок параллельных вычислений (свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2015630036).

Благодаря этому количество одновременно выполняемых операций за такт возросло с 32 до 128. Схема состояний одного арифметического узла показана в таблице.

Таким образом, было получено четырехкратное увеличение производительности. Полученная плата позволяет производить параллельный расчет координат точек достижения цели буровой платформы. Топологический чертеж блока параллельных вычислений представлен на рис. 2 (вид сверху).

Блок параллельных вычислений – микросхема, конструктивно-технологически исполненная в виде многокристальной сборки. Изготавливается по

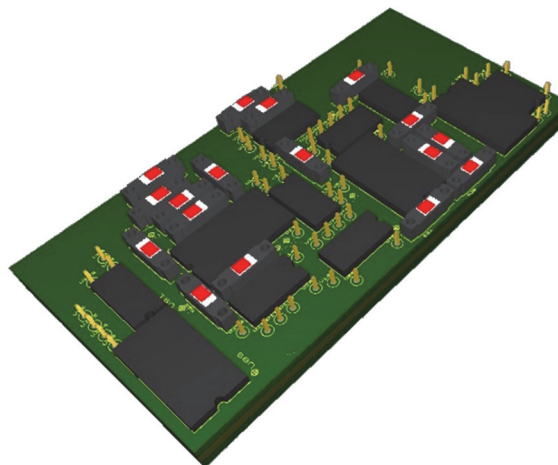


Рис. 2

тонкопленочной технологии в 2 уровня. Содержит в своем составе элемент 8-разрядного сопроцессора на базе архитектуры MCS-51, имеющего встроенный блок шифрации по ГОСТ 28147–89, блок 8-разрядной арифметики, массив программируемых счетчиков. Тактовая частота работы до 25 МГц, напряжение питания 3.8 В.

Так как микросхема применяется при решении задач, связанных с выполнением сложных математических операций, требующих максимально быстрого расчета, схема ее спецификации отличается от типовой. Таким образом, разработанная микросхема совместно с предложенной методикой позволяют решить электротехническую задачу бортового управления подводной необитаемой буровой установкой.

Таким образом, предложенная микросхема совместно с алгоритмом, обеспечивающим параллеливание навигационной задачи, позволяет существенно сократить время расчета координат подхода буровой установки к предполагаемому месту залегания. Благодаря реализации данного алгоритма на микросхеме отечественного произ-

водства отпадает необходимость закупки зарубежного оборудования. Однако следует отметить и некоторые недостатки. Разработанный координатор очень чувствителен к среде использования за счет производства по ленточной технологии, его применение затруднено в средах с повышенным радиационным фоном [5]. А так как большинство редкоземельных материалов имеют базовый радиационный фон, этот недостаток является существенным. Тем не менее, для разработки газонефтяных месторождений такое устройство применимо. Также хотелось бы отметить, что разработанный алгоритм имеет высокий уровень точности, что, например, для задач навигации летательных аппаратов будет более чем востребовано. Таким образом, в заключение хотелось бы отметить особую значимость работы для задач геологоразведки и добычи полезных ископаемых. Отмеченные недостатки не являются критичными, а указывают на высокую актуальность проделанной работы и возможные направления дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Системы передачи и обработки распределенной информации // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 5 (166). С. 198–211.
2. Малков А. В., Першин И. М., Помеляйко И. С. Математическая модель кислородского месторождения углекислых минеральных вод // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 7 (168). С. 116–125.
3. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 7 (168). С. 126–138.
4. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Синтез распределенных систем управления гидролитическими

сферными процессами месторождений минеральных вод // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2014. № 8 (157). С. 123–137.

5. Ильющин Ю. В., Чернышев А. Б. Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями // Изв. ЮФУ. 2010. № 12. С. 166–171.

6. Чыонг Данг Кхоа. Разработка и исследование метода наведения на маневрирующий объект на основе стохастического прогноза его движения: дис. ... канд. техн. наук / МГТУ им. Баумана. М., 2004. 133 с.

7. Цепков С. В. Синтез алгоритмов наведения летательных аппаратов с учетом дуального эффекта: дис. ... канд. техн. наук / ХГУП (ХВУ). Харьков, 1993. 165 с.

Yu. V. Ilyushin, I. M. Novozhilov, M. Yu. Shestopalov  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## TECHNIQUE AND MANAGEMENT SYSTEM OF POSITIONING OF THE GEOLOGICAL EXPLORATION UNDERWATER APPARATUS

*In modern conditions of a rapidly developing market, the quality of products is becoming increasingly important. The quality of products is significantly influenced by the raw materials from which it is produced. This article aims to improve the quality of the extracted raw materials by developing a high-speed positioning algorithm for an underwater drilling platform. To accomplish the task, the article proposes a method for calculating the coordinates of the positioning of the underwater vehicle carrying out geological exploration at a great depth. A hardware implementation of this algorithm in the on-board system is proposed by upgrading the DSP 1B577 computing processor. To the control block of which additional arithmetic logic devices are added, a microcircuit «parallel computing block» is created (Certificate of State Registration of the Topology of the Integrated Circuit No. 2015630036). The article also shows its layout, electronic wiring, circuit board and concludes that this device can be used in other global positioning systems of onboard systems.*

**System analysis, control, distributed systems, algorithm, drilling platforms**