

УДК 622.243

Р. И. АЛИМБЕКОВ, Н. П. РОГАТЫХ, В. Г. ТЕРЕШИН

ПОСТРОЕНИЕ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Получены алгоритмы обработки сигналов датчиков инклинометрического комплекса для различных комбинаций измеряемых величин. Показана целесообразность использования аппаратного и алгоритмического резервирования за счет одновременного применения гироскопического, грави- и магнитометрического модулей в инклинометрическом комплексе. *Инклинометрический комплекс; алгоритмическое и аппаратное резервирование; обработка сигналов; магнитометрические и инерциальные датчики ориентации*

Проблема управления траекторией бурения наклонно-направленных скважин в современной нефтегазодобывающей промышленности относится к числу наиболее важных и актуальных. Это обусловлено резким усложнением эксплуатационных условий (большой глубиной залегания продуктивных пластов, их труднодоступностью и проч.), а также повышением требований к точности проводки скважин (в том числе при кустовом бурении). Решение проблемы непосредственно связано с автоматизацией и компьютеризацией основных технологических операций, в частности, с разработкой измерительно-вычислительных инклинометрических комплексов, обеспечивающих требуемую точность определения необходимых параметров и обладающих высокой надежностью при работе в сложных эксплуатационных условиях [1]. При бурении скважин навигационная задача решается с использованием согласованных измерений, как минимум, двух неколлинеарных векторов физических полей в системах координат, взаимная ориентация которых осуществляется при помощи азимута α , зенитного угла θ и визирного угла φ [2–3], причем

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_2}{\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_1} \right), \quad (1)$$

$$\theta = \arctg \left[\frac{1}{\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_3} \sqrt{(\vec{b}_2 \cdot \vec{e}_3)^2 + (\vec{b}_1 \cdot \vec{e}_3)^2} \right], \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\vec{b}_2 \cdot \vec{e}_3}{\vec{b}_1 \cdot \vec{e}_3} \right), \quad (3)$$

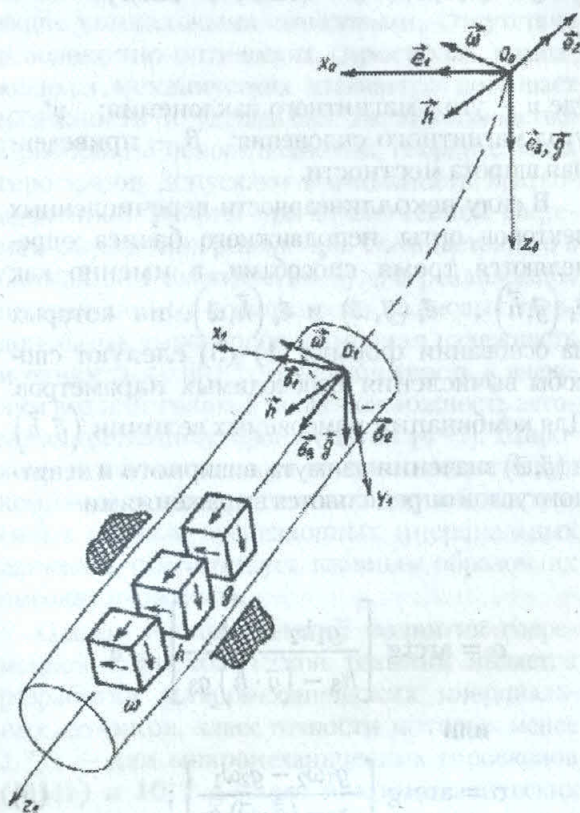


Рис. 1

где \vec{e}_i, \vec{b}_j ($i, j = 1, 2, 3$) – орты неподвижного R_e и подвижного R_b базисов, соответствующих правым системам прямоугольных декартовых координат $O_0X_0Y_0Z_0$ и $O_1X_1Y_1Z_1$. Заметим, что вектор \vec{e}_1 направлен по касательной к географическому меридиану на Север; \vec{e}_2 – по касательной к географической параллели на Восток; \vec{e}_3 – по гравитационной вертикали к центру Земли. Векторы \vec{b}_1, \vec{b}_2 определяют расположение базовых поверхностей,

используемых при установке измерительных модулей на шасси инклинометрического комплекса; \vec{b}_3 направлен по продольной оси цилиндрического корпуса скважинного снаряда от устья скважины к забою (рис. 1).

Принципы построения конкретных алгоритмов вычисления параметров (1)–(3) сводятся к выявлению зависимостей \vec{e}_i от измеряемых физических величин, в качестве которых используются: напряженность геомагнитного поля, ускорение свободного падения, угловая скорость вращения Земли. Единичные векторы указанных физических величин в базисе R_e имеют вид:

$$\begin{aligned} \vec{h} &= (\cos v^* \cos v, \sin v^* \cos v, \sin v), \\ \vec{g} &= (0, 0, 1), \quad \vec{\omega} = (\cos \beta, 0, -\sin \beta), \end{aligned} \quad (4)$$

где v — угол магнитного склонения; v^* — угол магнитного склонения; β — приведенная широта местности.

В силу неколлинеарности перечисленных векторов орты неподвижного базиса определяются тремя способами, а именно как $\vec{e}_i(\vec{g}, \vec{h})$, $\vec{e}_i(\vec{g}, \vec{\omega})$ и $\vec{e}_i(\vec{h}, \vec{\omega})$, из которых на основании формул (1)–(3) следуют способы вычисления необходимых параметров. Для комбинации измеряемых величин (\vec{g}, \vec{h}) и $(\vec{g}, \vec{\omega})$ значения азимута, визирного и зенитного углов определяются выражениями

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctg \left[\frac{g_1 h_2 - g_2 h_1}{h_3 - (\vec{g} \cdot \vec{h}) g_3} \right] + v^* \\ \text{или} \\ \alpha &= \arctg \left[\frac{g_1 \omega_2 - g_2 \omega_1}{\omega_3 - (\vec{g} \cdot \vec{\omega}) g_3} \right]; \\ \varphi &= \arctg \left(-\frac{g_2}{g_1} \right); \\ \theta &= \arctg \left(\frac{1}{g_3} \sqrt{g_1^2 + g_2^2} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

В случае использования комбинации единичных векторов $(\vec{h}, \vec{\omega})$ значения перечисленных углов могут быть вычислены согласно формулам:

$$\alpha = \arctg \frac{(h_1 \omega_2 - h_2 \omega_1) \times (\cos v^* \cos v \sin \beta - \sin v \cos \beta) - h_3 \sin v^* \cos v - (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \omega_3 \sin v^* \cos v}{(\cos v^* \cos v - (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \cos \beta) h_3 - (h_1 \omega_2 - h_2 \omega_1) \cdot \sin v^* \cos v \sin \beta + (\cos \beta - (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \cos v^* \cos v) \omega_3};$$

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{(1 - (\vec{h} \cdot \vec{\omega})^2)^2 - \left((h_3 - (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \omega_3) \sin v + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) h_3 - \omega_3 \right) \sin \beta - (h_1 \omega_2 - h_2 \omega_1) \times \sin v^* \cos v \cos \beta}}{(h_3 - (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \omega_3) \sin v + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) h_3 - \omega_3 \sin \beta - (h_1 \omega_2 - h_2 \omega_1) \sin v^* \cos v \cos \beta};$$

$$\varphi = \arctg \frac{(\sin \beta + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \sin v) \omega_2 + (h_3 \omega_1 - h_1 \omega_3) \sin v^* \cos v \cos \beta - (\sin v + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \sin \beta) h_2}{(\sin v + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \sin \beta) h_1 - (h_2 \omega_3 - h_3 \omega_2) \sin v^* \cos v \cos \beta - (\sin \beta + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \sin v) \omega_1}. \quad (6)$$

Заметим, что скалярные произведения векторов и функции угловых параметров, учитываемые при вычислениях (знак « \rightarrow » во втором выражении соответствует северным широтам), связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} \vec{h} \cdot \vec{g} &= \sin v, \quad \vec{\omega} \cdot \vec{g} = -\sin \beta, \\ \vec{\omega} \cdot (\vec{h} - \vec{g}) &= \cos v^* \cos \beta \cos v. \end{aligned} \quad (7)$$

Измерения составляющих векторов напряженности геомагнитного поля, ускорения свободного падения и угловой скорости вращения Земли осуществляются с помощью магнитометрических (феррозондовых), гравиметрических и гироскопических датчиков соответственно. Полагая, что оси чувствительности последних совпадают с ортами подвижного базиса R_b , представим вектор сигналов датчика информации о m -й измеряемой величине следующим образом:

$$\vec{u}_m = (u_{m1}, u_{m2}, u_{m3}) = k_m \cdot M \cdot \vec{n}_b, \quad (8)$$

где \vec{m}_b — единичный вектор измеряемой величины, принимающий значение \vec{h} , \vec{g} или $\vec{\omega}$ в зависимости от используемого датчика; M — модуль измеряемой величины; k_m — коэффициент преобразования датчика информации, одинаковый для всех осей чувствительности.

Тогда зависимость единичного вектора любой из измеряемых физических величин от выходных сигналов соответствующих датчиков имеет вид

$$\vec{m}_b = \frac{1}{|\vec{u}_m|} (u_{m1}, u_{m2}, u_{m3}), \quad (9)$$

где

$$|\vec{u}_m| = \sqrt{u_{m1}^2 + u_{m2}^2 + u_{m3}^2}. \quad (10)$$

Приведенные соотношения и сделанные представления позволяют уточнить алгоритмы обработки сигналов используемых датчиков информации с целью нахождения параметров ориентации инклинометрического комплекса в искривленной скважине.

Наиболее широкое распространение в нашей стране и за рубежом получили инклинометры с неподвижно закрепленными на шасси тремя феррозондами и тремя акселерометрами. Последние позволяют определять направление соответствующих измеряемых векторов с погрешностями $\Delta(\vec{g}) = 0,05-0,15$ град. и $\Delta(\vec{h}) = 0,1-0,2$ град. Необходимость определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, а также обсаженных стальными трубами, приводит к целесообразности использования инклинометрических комплексов, содержащих измерительные модули на базе инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров). При замене магнитометрических датчиков на гироскопические соответствующим образом (см. формулы (5)) меняется алгоритм вычисления азимута: $\alpha(\vec{g}, \vec{h}) \rightarrow \alpha(\vec{g}, \vec{\omega})$. При этом критериями необходимых изменений могут служить глубина скважины или превышение заданных пределов флуктуаций значений функции $\cos v^*$. Отказ какого-либо датчика устанавливается по критериям отсутствия изменений значений его сигналов u_{mj} в течение ряда измерительных циклов, а также превышения значений сигналов и величин (7), (10) соответствующих заданных пределов изменения.

С целью обеспечения работоспособности и надежности измерительно-вычислительно-

го комплекса целесообразно использовать аппаратное и алгоритмическое резервирование за счет одновременного применения гироскопического, грави- и магнитометрического модулей. В этом случае появляется возможность выбора более достоверной информации о параметрах ориентации скважины в зависимости от точности используемых датчиков (в том числе и при отказе одного из них), а также условий эксплуатации инклинометрической аппаратуры (магнитных свойств окружающей среды, наличия обсадных труб и буровых платформ).

Среди источников информации о векторе угловой скорости вращения Земли наиболее привлекательными, с точки зрения использования в сложных эксплуатационных условиях, являются волоконно-оптические и волновые твердотельные гироскопы, обладающие уникальными свойствами. Отсутствие в волоконно-оптических гироскопах вращающихся механических элементов повышает надежность и удешевляет их производство. Приборы на основе волновых твердотельных гироскопов допускают возможность кратковременной работы при отключенной системе возбуждения резонатора. Ожидается, что в ближайшем десятилетии будут реализованы потенциальные возможности волновых твердотельных гироскопов — высокая надежность и точность ($0,001^\circ/\text{ч}$), устойчивость к внешним воздействиям, а также возможность автоматизированного производства [4–5]. Широкому использованию в инклинометрических комплексах измерительных модулей, построенных на базе прецизионных инерциальных датчиков, препятствует, главным образом, их высокая стоимость.

Одним из направлений развития современной гироскопической техники является разработка микромеханических инерциальных датчиков, класс точности которых менее $1^\circ/\text{ч}$ — для микромеханических гироскопов (ММГ) и 10^{-3} g — для микромеханических акселерометров (ММА). Использование при проектировании этих устройств материаловедческой и технологической баз твердотельной микроэлектроники позволяет обеспечить предельно малые габариты и вес, высокую надежность и низкую стоимость микромеханических датчиков [4–6]. Последние имеют встроенные элементы управления и обработки информации, малое потребление энергии, большую устойчивость к внешним воздействиям. При производстве инерциальных микромеханических датчиков применяют высокодобротные неметаллические материалы

(монокристаллический кремний, плавный кварц, пьезокерамику), технологии фотолитографии и диффузионного плавления. Практически полная совместимость механической части датчика и сервисной электроники позволяют создавать чип — гироскопы и сборки инерциальных элементов объемом 0,5–10 см³ с потребляемой мощностью 0,5–1 Вт [6]. Общим для всех ММГ является принцип возбуждения колебаний (с помощью специальных пьезоэлектрических или электростатических устройств) чувствительного элемента и измерение его реакции при переносном угловом движении основания. В качестве примеров микромеханических инерциальных датчиков, уже освоенных в производстве, можно назвать: кремниевые ММГ и ММА фирмы Rockwell International, разработанные в лаборатории им. Ч. Дрейпера (США); кварцевые ММГ и ММА фирмы Systron Donner (США); пьезокерамические ММГ фирмы Murata (Япония). Среди отечественных фирм, занимающихся разработкой подобных датчиков, следует выделить: ЦНИИ машиностроения, НИИ прикладной механики им. акад. В. И. Кузнецова, НПК «Вектор» (все — Москва); НИИ командных приборов, Центр микротехнологии и диагностики России, СПб ГУАП, АОЗТ «Гирооптика» (все — С.-Петербург); НПП «Темп-Авиа» (Арзамас). Использование в инклинометрической аппаратуре дешевых микромеханических инерциальных датчиков (в качестве основных источников информации) пока препятствует их недостаточная точность. Разработка гироскопических устройств, соизмеримых по стоимости с магнитометрами, а по точности и надежности их превосходящие, позволит осуществить более полное использование гироскопических датчиков в инклинометрических комплексах.

Резервирование, осуществляемое в случае обнаружения отказов, может быть как аппаратным, так и чисто алгоритмическим. В частности, если основными источниками информации инклинометрического комплекса являются магнитометрический и гравиметрический модули и происходит отказ гравиметрического датчика (акселерометра), обеспечивающего измерение компоненты g_3 , то необходимая информация может быть определена либо по сигналам резервного гироскопиче-

ского модуля как

$$g_{3R} = \frac{1}{1 - (\vec{h} \cdot \vec{\omega})^2} \left[\sin v + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \sin \beta \right] h_3 - \left[\sin \beta + (\vec{h} \cdot \vec{\omega}) \sin v \right] \omega_3 - (h_1 \omega_2 - h_2 \omega_1) \sin v^* \cos v \cos \beta, \quad (11)$$

либо с помощью резервного алгоритма. Последний основывается на свойствах скалярного произведения векторов $\vec{\omega}$ и \vec{g} (7) и позволяет найти недостающую компоненту в виде

$$g_{3R} = \frac{1}{h_3} \cdot [(\sin v)_c - h_1 g_1 - h_2 g_2], \quad (12)$$

где значения h_1 , h_2 , h_3 , g_1 , g_2 определяются сигналами действующих датчиков, а функция $(\sin v)_c$ выступает в роли постоянного коэффициента, вычисленного по соответствующим сигналам до момента отказа указанного акселерометра. Аналогичным путем может быть получена необходимая информация при отказах других датчиков гравиметрического и магнитометрического модулей. Выражение (12) позволяет упростить вычисления азимута и зенитного угла без привлечения резервного модуля инклинометрического комплекса. В случае отказа двух или всех трех датчиков гравиметрического модуля может применяться только аппаратное резервирование, в ходе которого вычисления значений зенитного и визирного углов осуществляются по сигналам магнитометрического и гироскопического модулей. При этом используются значения тригонометрических функций углов v , β , полученных по текущим измерениям сигналов до момента отказа гравиметрического модуля.

Для оптимизации стоимостных, энергетических и габаритно-массовых характеристик инклинометрического комплекса целесообразно применять схемы резервирования с использованием мажоритарных элементов, подключаемых к выходам датчиков, обладающих информационной избыточностью. Способностью выдавать информацию, как минимум, по двум измеряемым параметрам обладают, например, многофункциональные (комбинированные) миниатюрные и микромеханические инерциальные датчики. В частности, можно указать микромеханический гироскоп — акселерометр вибрационного типа, чувствительный элемент которого представляет собой инерционную массу, подвешенную в двухосном, упругом подвесе [7]. Использование

комбинированных (гибридных) систем, в которых осуществляется дублирование измерительного процесса датчиками различной физической природы, объединяет в себе достоинства магнитометрических и гироскопических модулей.

Таким образом, в настоящее время имеются предпосылки к комплексному применению магнитометрических и инерциальных датчиков в информационно-вычислительных системах для определения параметров ориентации наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Использование предлагаемых способов аппаратурного и алгоритмического резервирования позволяет обеспечить необходимые требования к точности и надежности при создании инклинометрических комплексов, а также сократить сроки бурения скважин за счет исключения спусковых и подъемных операций для замены датчиков в соответствии с условиями эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алимбеков Р. И., Рогатых Н. П., Терешин В. Г.** Вопросы построения измерительно-вычислительных комплексов на базе инерциальных и магнитометрических датчиков для систем управления буровым инструментом // Восьмой Всерос. съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов. Пермь: УрО РАН, 2001. С. 37.
2. **Исаченко В. Х.** Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987. 216 с.
3. **Рогатых Н. П.** Методические аспекты построения инклинометров // Геофизическая аппаратура. 1999. Вып. 102. С. 66–79.
4. **Климов Д. М.** Механика и новые технологии // Вестник Академии наук. 1999. Т. 69, № 12. С. 1069–1080.
5. **Пешехонов В. Г.** Проблемы и перспективы современной гироскопии // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1–2. С. 48–56.
6. **Северов Л. А., Пономарев В. К., Панфоров А. И. и др.** Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, техно-

логии, пути развития // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41, № 1–2. С. 57–73.

7. **Агильдиев В. М., Дрофа В. Н.** Комбинированный микромеханический гироскоп-акселерометр для инерциальных измерительных систем // Космонавтика и ракетостроение. 1995. № 5. С. 79–83.

ОБ АВТОРАХ



Алимбеков Роберт Ибрагимович, доцент, директор НИИ технических систем «Пилот». Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по элементам и устройствам систем управления (УАИ, 1977). Исследования и разработки в области измерительно-вычислительных инклинометрических комплексов.



Рогатых Николай Павлович, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр. того же НИИ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по элементам и устройствам систем управления (УАИ, 1983). Исследования в области разработки датчиков и систем ориентации подвижных объектов.



Терешин Валерий Глебович, профессор, дейст. чл. Междунар. акад. навигации и управления движением, профессор кафедры теоретической механики УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по гироскопии (ЮУрГУ, 1993). Исследования в области механики гироскопических приборов и устройств.