

05.13.18
Б 755

Контроль
экземпляров

На правах рукописи

Бодунов Сергей Богданович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНКЛИНОМЕТРА ЗАБОЙНОЙ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА**

Специальности: 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»
05.11.03 – «Приборы навигации»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск
2003

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Лысов А.Н.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Телегин А.И.;

кандидат технических наук,
доцент Белянин Л.Н.


Ведущая организация – Научно-производственное предприятие
«Пилот», г. Уфа.

Защита диссертации состоится 28 мая 2003г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Ваш отзыв, заверенный печатью, просим выслать по адресу:
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2003г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор  Чернявский А.О.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

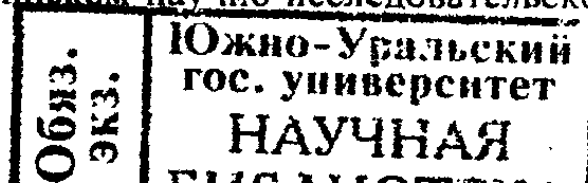
В середине семидесятых годов в нашей стране и за рубежом возросли объемы бурения нефтяных и газовых скважин. Возросло также число горизонтальных, направленных и морских скважин, при проводке которых необходимы частые замеры их кривизны.

Измерения углового положения скважины традиционным способом с помощью кабельного инклинометра не технологичны, так как его спуск и подъем может занимать несколько часов. При этом возникают непроизводительные затраты времени в связи с неработающей буровой, к которым следует отнести периоды проведения подготовительных работ, монтажа и демонтажа оборудования для спуска такого инклинометра в скважину. Поэтому появилась экономическая необходимость в создании нового инклинометра, который бы в отличие от классического был встроен в состав буровой колонны и, следовательно, позволил бы определять параметры скважины, не нарушая процесса бурения.

Технология бурения подразумевает чередование непосредственного бурения с остановками до 4 минут, необходимых для наращивания очередной трубы. Задача угловой ориентации скважины может быть выполнена, таким образом, в моменты технологических остановок буровой колонны. В отечественной литературе данный тип инклинометра носит название «инклинометр забойной телеметрической системы» (ЗТС), так как он входит в состав системы, позволяющей (кроме измерения углов ориентации) определять ряд дополнительных технологических параметров.

В разработке методов и средств измерения скважины в процессе бурения с 70-ых годов за рубежом принимало участие около 40 фирм, в том числе Scientific Drilling Controls, Sperry Sun, Exxon Production Research, General Electric, Teleco Oilfield Services Inc., Schlumberger, Bi-Hughes Inc. и др.

Аналогичными исследованиями в бывшем СССР занимались в институте машиноведения и автоматизации (ИМА) АН УССР, Уральском филиале АН СССР, Куйбышевском политехническом институте, НИИ механики МГУ, Уфимском авиационном институте, Всероссийском научно-исследовательском



институте геофизических исследований геологоразведочных скважин (ВНИИГИС, г. Октябрьский) и в других научных учреждениях.

В основе азимутальных датчиков разрабатываемых инклинометров были положены однокатушечные феррозондовые преобразователи, измеряющие проекции вектора магнитного поля Земли. Основным недостатком этих датчиков является их чувствительность к ферромагнитным аномалиям, вызванных, в частности, использованием обсадных труб из магнитомягких материалов. Поэтому применение таких инклинометров ограничено.

Использование сегодня гироскопических инклинометров, основанных на применении традиционных гироскопических датчиков, исключается, по причине невозможности последних выдержать жесткие условия эксплуатации. Поэтому в практике отечественных и зарубежных фирм нет гироскопических инклинометров, входящих в состав буровой колонны и способных обеспечивать необходимой информацией об угловом положении скважины без нарушения технологии бурения. Соответственно, отсутствуют и математические модели, и алгоритмы функционирования гироскопических инклинометров забойных телеметрических систем.

Цель и основные задачи диссертационной работы

Целью работы является разработка математических моделей и алгоритмов функционирования инклинометра забойной телеметрической системы на базе твердотельного волнового гироскопа.

В связи с поставленной целью решаются следующие задачи:

1. Разработка алгоритма функционирования электронных систем твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) скважинного исполнения.
2. Разработка математических моделей и алгоритмов вычисления угловой ориентации инклинометра.
3. Разработка математических моделей выходного сигнала ТВГ и алгоритмов оценки параметров тренда этих моделей.

Методы исследований

К основным методам, используемым при выполнении диссертационной работы, относятся методы: идентификации параметров математических моделей, теории линейных конечно-разностных уравнений, теории углового движения твердого тела в матрично-векторном описании с помощью углов

Эйлера-Крылова и в кватернионной трактовке, а также методы цифровой обработки сигналов и теории построения электронных систем ТВГ.

Научная новизна состоит в разработке:

1. Математической модели и алгоритма определения угловой ориентации гироскопического инклинометра забойной телеметрической системы на основе классического решения с использованием параметров Эйлера-Крылова. Модель учитывает перекосы осей чувствительности первичных датчиков и не идентичность их электрических параметров.
2. Алгоритма вычисления ориентации углового положения инклинометра забойной телеметрической системы (ЗТС) относительно географической системы координат, на основе применения фундаментальных теорем алгебры кватернионов. Алгоритм отличается тем, что не требует контроля за угловым положением исследуемого объекта.
3. Математической модели выходного сигнала твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) и устойчивого алгоритма оценки параметров тренда этой модели. Алгоритм оценки модернизирован исходя из учета специфики выходной информации чувствительного элемента.
4. Математической модели выходного сигнала ТВГ и алгоритма оценки параметров тренда этой модели, с применением двукратного осреднения выходного сигнала чувствительного элемента, на основе линейных разностных уравнений для прогнозирующих фильтров. Алгоритм отличается тем, что не содержит разности близких по величине больших чисел и, следовательно, позволяет значительно экономить память микропроцессоров управления ТВГ.
5. Алгоритма функционирования электронных систем ТВГ двухдетальной конструкции для гироскопического инклинометра забойной телеметрической системы, отличающегося простотой схемотехнической реализации.

Практическая значимость работы состоит во внедрении следующих результатов в разработки научно-производственного предприятия Медикон (г. Миасс):

1. Математических моделей выходного сигнала ТВГ и алгоритмов оценки параметров трендов этих моделей, позволивших уменьшить случайную составляющую дрейфа гироскопа, и, следовательно, упростить требования к разработке электронных систем управления.

2. Математических моделей и алгоритмов вычисления угловой ориентации, связанной с объектом системы координат, относительно наземной географической системы координат.
3. Алгоритма функционирования электронных систем ТВГ, позволившего упростить схемотехническую реализацию электронных систем и, как следствие, значительно уменьшить габаритные размеры и потребляемую мощность прибора.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на двух международных конференциях по гироскопии и навигации в Штуттгарте (Германия, сентябрь 1999г) и С-Петербурге (май 2001), а также на двух совместных научных сессиях Секции навигационных систем и их чувствительных элементов и С.-Петербургской секции прецизионной гироскопии (ИПМ, Москва, март 1999г. и апрель 2001г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Основной текст занимает 121 стр. Библиография содержит 52 наименования.

В первой главе определены основные требования для гироскопа используемого в инклинометре забойной телеметрической системы (ЗТС), и разработан алгоритм функционирования электронных систем управления твердотельного волнового гироскопа (ТВГ), реализация которого позволила создать прибор скважинного исполнения с необходимыми параметрами потребляемой мощности и габаритных размеров.

Акселерометры, входящие в состав гироскопического инклинометра ЗТС, совместно с ферромагнитными датчиками уже сравнительно давно используются в ЗТС и хорошо адаптированы для применения в новых условиях. Для решения задачи ориентации скважины необходим гироскоп, включенный в состав инклинометра ЗТС, и обладающий следующими техническими данными:

- вибропрочность в частотном диапазоне от 3 до 300Гц и перегрузках до 60g;
- рабочий температурный диапазон – - 40÷120°C;
- потребляемая мощность (автономный режим) – 1-2Вт;
- габаритные размеры ограничены диаметром Ø 40мм;
- время готовности – несколько секунд;
- случайная составляющая дрейфа – 0,1 град/час.

Существующие алгоритмы функционирования электронных систем ТВГ не позволяют достичь требуемых габаритных размеров и потребляемой мощности, поэтому предложен алгоритм функционирования систем ТВГ со следующими основными принципами:

- электронные системы, в том числе измерения и управления колебаниями, строятся на импульсной основе с формированием рабочего цикла, который разделяется во времени на интервалы измерения и управления;
- регистрация сигналов основывается на способе “обратного” включения, когда выходные сигналы снимаются с осевого держателя резонатора (рис.1);
- низковольтное (± 12) и маломощное исполнение.

Порядок функционирования систем для режима датчика угловых скоростей построен на циклической основе, при этом один рабочий цикл гироскопа, включающий некоторое количество периодов колебаний резонатора, разбит на интервалы измерения и управления (рис.2). На начальных периодах цикла измеряются исходные сигналы, представляющие собой амплитуду синфазных и квадратурных колебаний. При этом в пределах каждого периода колебаний съём сигнала неоднократно повторяется через равные промежутки времени с последующей цифровой квадратурной обработкой результатов измерения. Остальные периоды рабочего цикла используются для выдачи управляющих сигналов. Все перечисленные контуры управления формируются программным способом. На выходе микропроцессора выдаются управляющие импульсы с разделением по времени, в том числе импульсы системы приведения, число которых определяется скоростью вращения гироскопа.

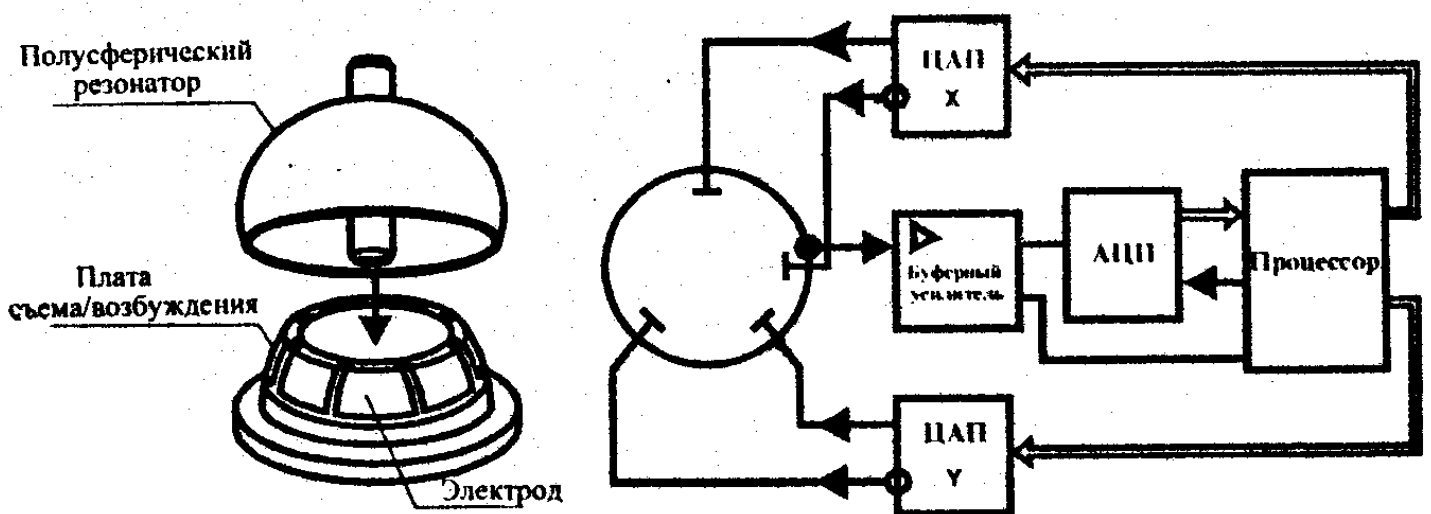


Рис. 1. Принцип построения ТВГ и электронной системы управления

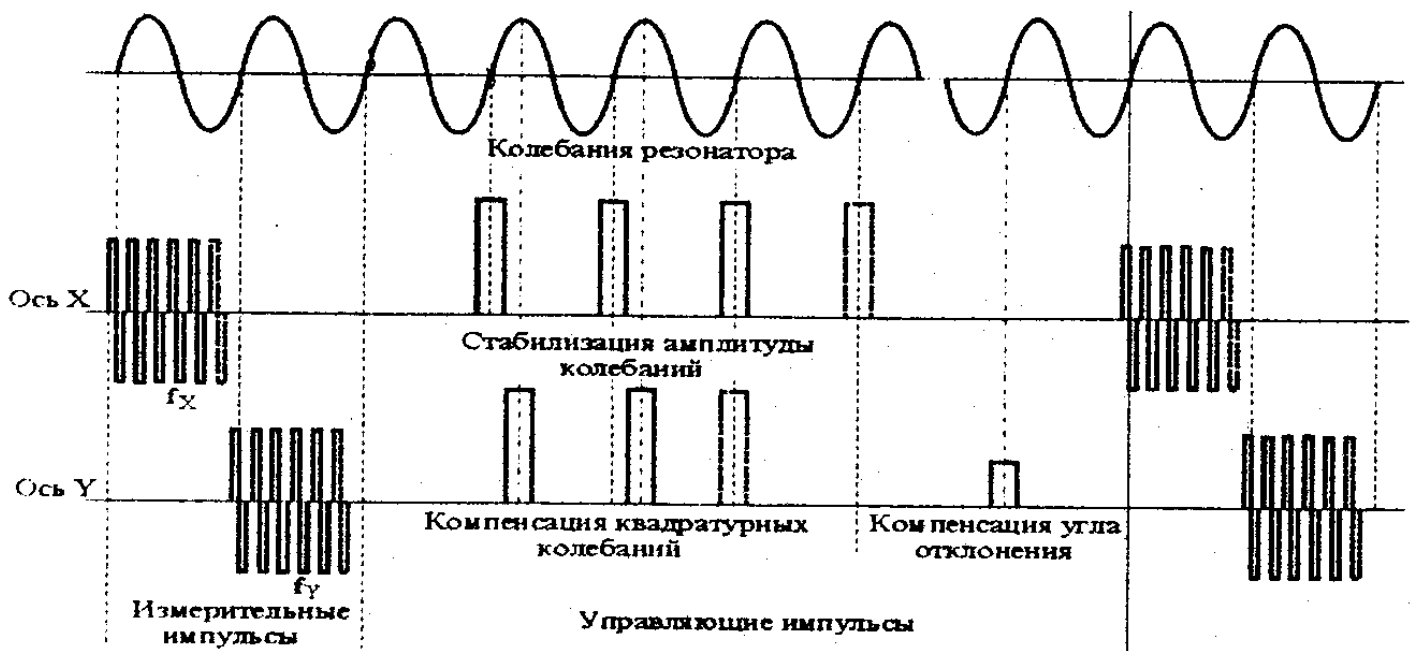


Рис. 2. Алгоритм функционирования электронных систем ТВГ

Особенностью предложенного алгоритма функционирования является полностью импульсная система подавления квадратурных колебаний резонатора, включенная в единый рабочий цикл управления волновой картиной ТВГ. В отличие от классической схемы электростатической коррекции, импульсный способ балансировки не требует сложной системы электродов коррекции и прост в схемотехнической реализации.

Во второй главе предложены два возможных способа решения задачи угловой ориентации скважины гироскопическим инклинометром забойной телеметрической системы:

- классического, с использованием углов Эйлера-Крылова, модифицированного, с целью учета неидеального расположения чувствительных элементов относительно базовых плоскостей инклинометра;
- основанного на применении фундаментальных теорем теории кватернионов.

Для решения задачи вводится географическая $R(O\xi\eta\zeta)$ система координат и система координат $Ox_3y_3z_3$ связанная со скважинным снарядом, угловое положение которого определяется углами Эйлера-Крылова, а именно, зенитным углом θ , углом φ , называемым в геодезии углом установки отклонителя, и азимутальным углом α (рис. 3).

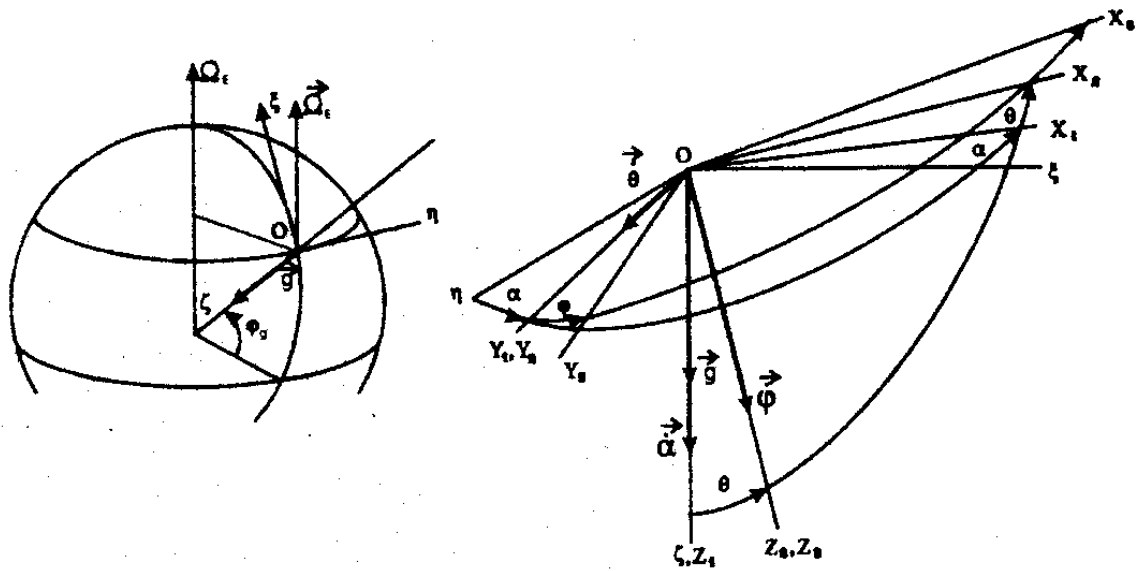


Рис. 3. Системы координат

Определение ориентации скважины основано на измерении проекций векторов угловой скорости вращения Земли $\vec{\Omega}_{3R}$ и ускорения силы тяжести \vec{g}_R на оси чувствительности датчиков, в периоды технологических остановок буровой колонны. Уравнения, определяющие связь показаний датчиков ориентации с истинными значениями измеряемых величин в векторной форме, имеют вид $\vec{\Omega}_{3R_1} = A \vec{\Omega}_{3R}$, $\vec{g}_{3R} = A \vec{g}_R$, $A = A_\varphi A_\theta A_\alpha$, (1)

где $A_\varphi, A_\theta, A_\alpha$ - матрицы последовательных поворотов.

Выражения (1) переписываются в скалярном виде:

$$\begin{cases} \cos \alpha = c_1 \cos \theta \cos \varphi - c_2 \cos \theta \sin \varphi + c_3 \sin \theta, \\ -\sin \alpha = c_1 \sin \varphi + c_2 \cos \varphi, \\ v = (c_2 \sin \varphi - c_1 \cos \varphi) \sin \theta + c_3 \cos \theta, \end{cases} \quad \begin{cases} v_1 = -\cos \varphi \sin \theta, \\ v_2 = \sin \varphi \sin \theta, \\ v_3 = \cos \theta. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (2) однозначно определяют искомые углы ориентации, в частности азимутальный угол:

$$\alpha = \begin{cases} \arctg \frac{c_2 b_1 - c_1 b_2}{c_3(1-b_3^2) - c_1 b_1 b_3 - c_2 b_2 b_3}, \text{ при } c_2 v_1 > c_1 b_2, \\ \arctg \frac{c_2 b_1 - c_1 b_2}{c_3(1-b_3^2) - c_1 b_1 b_3 - c_2 b_2 b_3}, \text{ при } c_2 v_1 < c_1 b_2, \\ \pi, \text{ при } c_2 v_1 = c_1 b_2, c_3(1-v_3^2) < v_3(c_1 v_1 + c_2 b_2). \end{cases}$$

Для перехода к модели, учитывающей неортогональность осей чувствительности датчиков и не идентичности их нулевых сигналов обозначим через \vec{e}_i^f, \vec{e}_i^a - направляющие единичные вектора осей чувствительности i -того датчика. Тогда выходные сигналы будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 U_i' &= U_{0i}' + U_{mi}' \left[c_1 \cos(\bar{e}_i', \bar{i}) + c_2 \cos(\bar{e}_i', \bar{j}) + c_3 \cos(\bar{e}_i', \bar{k}) \right], \\
 U_i'' &= U_{0i}'' + U_{mi}'' \left[b_1 \cos(\bar{e}_i'', \bar{i}) + b_2 \cos(\bar{e}_i'', \bar{j}) + b_3 \cos(\bar{e}_i'', \bar{k}) \right], \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Скалярные уравнения (3) переписутся в матричном виде,

где \bar{B}^*, \bar{C}^* – векторы показаний датчиков с учетом ошибок, \bar{B}, \bar{C} – векторы выходных сигналов для идеальных датчиков, E – единичная матрица,

$$\bar{B}^* = (E + \varepsilon) \cdot \bar{B}, \quad \bar{C}^* = (E + \mu) \bar{C}, \quad (4)$$

ε, μ – матрицы перекосов осей акселерометров и гироскопов.

С учетом (4) искомые: зенитный угол θ , угол установки отклонителя φ и азимутальный углы находятся по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi = - \frac{b_2^* + \varepsilon_3^{(2)} b_1^* - \varepsilon_1^{(2)} b_3^*}{b_1^{(2)} - \varepsilon_3^{(1)} b_2^* + \varepsilon_2^{(1)} b_3^*}, \quad \operatorname{tg} \theta = - \frac{\sqrt{(b_1^* - \varepsilon_3^{(1)} b_2^* + \varepsilon_2^{(1)} b_3^*)^2 + (-\varepsilon_3^{(2)} b_1^* + b_2^* - \varepsilon_1^{(2)} b_3^*)^2}}{(-\varepsilon_2^{(3)} b_1^* - \varepsilon_1^{(3)} b_2^* + b_3^*)},$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1'} = \frac{(\mu_3^{(2)} c_1^* + c_2^* - \mu_1^{(2)} c_3^*) b_1 - (c_1^* - \mu_3^{(1)} c_2^* + \mu_2^{(1)} c_3^*) b_2}{(-\mu_2^{(3)} c_1^* + \mu_1^{(3)} c_2^* + c_3^*) + b_1 b_3},$$

$$\text{где } b_r = (c_1^* - \mu_3^{(1)} c_2^* + \mu_2^{(1)} c_3^*) b_1 + (\mu_3^{(2)} c_1^* + c_2^* - \mu_1^{(2)} c_3^*) b_2 + (-\mu_2^{(3)} c_1^* + \mu_1^{(3)} c_2^* + c_3^*) b_3.$$

Рассмотрим теперь другой подход к построению алгоритмов определения угловых параметров скважины, в основе которого положена одна из фундаментальных теорем алгебры кватернионов о возможности поставить в соответствие двум неколлинеарным векторам кватернион конечного поворота одного вектора до совпадения с другим.

Из показаний гироскопов и акселерометров в каждый момент времени нам известны составляющие вектора ускорения $\bar{g} = (g_x, g_y, g_z)$ и угловой скорости $\bar{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ на оси системы $Ox_3 y_3 z_3$, связанной с инклинометром. В географической системе координат $O\xi \eta \zeta$ с осью $O\zeta_0$, направленной вдоль меридиана устья скважины на Север, имеем $\bar{g}_0 = (0, 0, g)$, $\bar{\omega}_0 = (\Omega_r, 0, \Omega_B)$, где g – величина ускорения силы тяжести, Ω_r, Ω_B – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора угловой скорости Земли. Разница между векторами \bar{g} и \bar{g}_0 в том, что это один и тот же вектор, но заданный в двух системах

координат. Представим, однако, что составляющие вектора \vec{g}_0 — это составляющие в системе $Ox_3y_3z_3$. Тогда мы имеем два вектора \vec{g} и \vec{g}_0 , заданные в одной системе координат. Этим двум векторам ставится в соответствие нормированный кватернион $M = \frac{1}{g^2}(\vec{g} \cdot \vec{g}_0 + \vec{g} \times \vec{g}_0)$, т.е. кватернион с компонентами

$$\mu_0 = \frac{1}{g}g_z, \quad \mu_1 = \frac{1}{g}g_y, \quad \mu_2 = -\frac{1}{g}g_x, \quad \mu_3 = 0.$$

В свою очередь этому кватерниону соответствует переход от системы $O\xi\eta\zeta$ к системе $Ox_1y_1z_1$ путем конечного поворота на угол $\alpha = \arccos \mu_0$ ($0 \leq \alpha < \pi$)

вокруг оси $\vec{m}_1 = (m_{1x}, m_{1y}, 0)$, где $m_{1x} = \frac{g_x}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}$, $m_{1y} = -\frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}$.

Система $Ox_1y_1z_1$ совпадает с системой $Ox_3y_3z_3$ с точностью до поворота вокруг вектора \vec{g}_0 . Сам кватернион, осуществляющий конечный поворот системы $O\xi\eta\zeta$ вокруг оси \vec{m}_1 на угол α имеет вид $\Lambda = \cos \frac{\alpha}{2} + \vec{m}_1 \sin \frac{\alpha}{2}$.

Нахождение кватерниона, переводящего систему $Ox_1y_1z_1$ в систему $Ox_3y_3z_3$, сводится к поворотам векторов $\vec{\omega}_0$ и $\vec{\omega}$ на углы $\chi_1 = \frac{\pi}{2} - \Phi$ и $\chi_2 = \arccos \frac{\omega_z}{\Omega}$, в результате чего получаются векторы $\vec{\omega}_0^* = L_1 \circ \vec{\omega}_0 \circ L_1^{-1}$, $\vec{\omega}^* = L_2 \circ \vec{\omega} \circ L_2^{-1}$, где

$$L_i = \cos \frac{\pi - \chi_i}{2} + \vec{e}_i \sin \frac{\pi - \chi_i}{2}, \quad \vec{e}_1 = \frac{\vec{g}_0 \times \vec{\omega}_0}{g\Omega}, \quad \vec{e}_2 = \frac{\vec{g}_0 \times \vec{\omega}}{g\Omega},$$

символ \circ означает операцию кватернионного умножения.

Векторам $\vec{\omega}_0^*$ и $\vec{\omega}^*$, по аналогии с векторами \vec{g}_0 и \vec{g} , поставим в соответствие кватернион $M_2 = \frac{\vec{\omega}^* \cdot \vec{\omega}_0^* + \vec{\omega}^* \times \vec{\omega}_0^*}{\Omega^2}$ с компонентами $\mu_{20}, \mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{23}$.

Кватернион, преобразующий систему $Ox_1y_1z_1$ в систему $Ox_3y_3z_3$ имеет вид

$$M = \cos \frac{\beta}{2} + \vec{m}_2 \sin \frac{\beta}{2},$$

где $\beta = \arccos \mu_{20}$ ($0 \leq \beta < \pi$), $\vec{m}_2 = \frac{1}{\sqrt{\mu_{21}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{23}^2}} (0, 0, 1) \text{ sign } \mu_2$.

Результирующий кватернион N , переводящий систему $O\xi\eta\zeta$ в систему $Ox_3y_3z_3$, найдется из соотношения $N = \Lambda \circ M$.

Используя связь компонентов кватерниона N с элементами результирующей матрицы направляющих косинусов A (1), связывающей систему $Ox_3y_3z_3$ с системой $O\xi\eta\zeta$, легко определяются все угловые параметры скважины. Отметим, что кватернионный подход к определению угловых параметров скважины с помощью гироскопического инклинометра рассмотрен в работе Чеснокова Г.И., Галкина В.И., Галкина Д.В. для случая измерения в процессе движения, где задача сведена к решению соответствующих кинематических уравнений без указания способа определения начальных условий. Вышеприведенный алгоритм как раз и решает эту задачу.

Из предыдущего следует, что для определения углового положения скважины в моменты технологических остановок буровой колонны необходимо оценить величины проекций векторов ускорения силы тяжести и угловой скорости Земли на оси чувствительности гироскопов и акселерометров.

Поэтому в третьей главе, для выбранных математических моделей выходного сигнала ТВГ, разработаны следующие алгоритмы оценки параметров трендов этих моделей:

- 1) модифицированный, исходя из специфики выходных данных ТВГ, алгоритм Хубера, устойчивый к появлению случайных данных;
- 2) полностью рекуррентный, не содержащий разности близких по величине больших чисел, алгоритм, удобный для реализации на базе скважинного микропроцессора управления ТВГ.

В общем случае в режиме определения ориентации сигналы имеют вид полиномов, на которые накладывается помеха:

$$U(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_l t^l + \xi(t), \quad (5)$$

где $U(t)$ – выходной сигнал ЧЭ, t – текущее время, a_0, \dots, a_l – коэффициенты, в которых содержится нужная информация о величине угловой скорости Земли, $\xi(t)$ – помеха (погрешность измерения).

Задача предварительной обработки выходных сигналов датчика – подавление помехи $\xi(t)$ с целью оценки коэффициентов полинома (5).

Для решения этой задачи наибольшее применение получили оптимальные линейные оценки, базирующиеся на методе наименьших квадратов (МНК), в частности его рекуррентный вариант. Следует отметить, что МНК базируется на предположении нормальности распределения случайной величины $\xi(t)$. Однако, когда это предположение не имеет места, то оценки параметров, полученные с помощью этого метода, быстро теряют свои свойства. Известно также, что оценки МНК весьма чувствительны к наличию резко выделяющихся наблюдений среди обрабатываемых данных. Всё это привело к разработке методов оценивания, учитывающих специфику обрабатываемых данных. К ним относятся робастные (устойчивые) методы анализа, наиболее распространенным из которых с практической точки зрения оказывается метод Хубера, основанный на принципе максимального правдоподобия.

Для случая интегральной коррекции выходной информации по методу Хубера рассмотрим модель (5), учитывающую, во-первых, интегральную коррекцию, или осреднение выходного сигнала ЧЭ с целью повышения отношения полезного сигнала к помехе, а, во-вторых, дрейф по времени нулевого сигнала ЧЭ $N(i) = U + F(t_i - t_0) + V(t_i - t_0)^2 + \xi(i)$, (6)

где $N(i) = \sum_{k=1}^i \Delta N(k)$, $\Delta N(k)$ – выходной сигнал ЧЭ в моменты времени t_k ,

$t_0 = \frac{T}{2}$ (T- интервал измерений), $t_i = (i-1)\tau$ – дискретные моменты времени, $i = 1, \dots, n$; τ – такт опроса, U, F, V – оцениваемые параметры, $\xi(i)$ – погрешность аппроксимации.

Переход в модели (6) к симметричному полиному, как известно, повышает надежность получаемых оценок.

Применительно к модели (6) схему Хубера необходимо несколько модифицировать в связи с тем, что контролю на аномальность подлежат не значения $N(i)$, как это следовало бы при прямом применении метода Хубера, а измеряемая величина $\Delta N(i)$. Иными словами, наряду с невязками

$\varepsilon(i) = N(i) - [U + F(t_i - t_0) + V(t_i - t_0)^2]$ должны рассматриваться и невязки

$\tilde{\varepsilon}(i) = \Delta N(i) - [F + 2V(t_i - t_0)]$.

С учетом этого, алгоритм оценки параметров U, F, V применительно к модели (6) выводится по схеме Хубера :

$$\sum_{i=1}^n f\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma}\right) \left(t_i - \frac{T}{2}\right)^k = 0, \quad \sum_{i=1}^n f^2\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma}\right) = (n - \ell - 2)\beta^*,$$

$$k = 0, \dots, \ell, \quad \beta^* = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(u) e^{-\frac{u^2}{2}} du, \quad f(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \leq c \\ c, & \text{если } x > c \\ -c, & \text{если } x < -c \end{cases}$$

Процесс останавливается, когда на двух итерациях ℓ и $\ell + 1$ выполняется условие $|F^{\ell+1} - F^\ell| \leq \Delta_{\text{доп}}$.

Выбор параметра F в качестве индикатора остановки процесса итераций продиктован тем, что исходя из физических соображений параметр F пропорционален величине средней за время измерений угловой скорости в направлении оси чувствительности гироскопа. Постоянную c , следуя рекомендации Хубера, при наличии не более 20% количества аномальных измерений можно принять $c=2,0$. Величина β составляет $\beta=0,92053(n-3)$, $\tilde{\beta}=0,92053(n-2)$, а $\Delta_{\text{доп}}$ можно принять равной 0,05.

Изложенный выше алгоритм, несмотря на его эффективность имеет определенный недостаток - вследствие наличия сумм приходится оперировать при расчетах с разностями больших чисел. С ростом степени аппроксимирующего полинома (1) эта проблема еще более обостряется. В связи с этим для оценки параметров выходной информации ЧЭ есть смысл провести анализ применения какого-либо рекуррентного варианта метода наименьших квадратов (МНК). Наиболее перспективным с этой точки зрения является вариант МНК - оценок в виде прогнозирующего фильтра, применение которого наряду с рекуррентностью позволяет в определенной мере отбраковывать аномальные измерения. Анализ этого варианта МНК проводится на примере оценки коэффициентов в полиномиальной модели

$$Z(t) = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 + \xi(t) \quad (7)$$

Модель (7) получается при двукратном осреднении выходной информации датчика, т.е. когда измерение представляет собой или интеграл от угла (для гироскопа) или интеграл от скорости (для акселерометра), т.е. для

дискретного случая
$$Z(i) = \tau \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^k \Delta N(l) = \tau \sum_{k=1}^i (i+k-1) \Delta N(k).$$

Используя известную методику, получим конечно-разностное уравнение для прогнозируемых на шаг вперед значений $\hat{Z}(i+1) \equiv y_i$ ($\hat{Z}(i)$ - сглаженное значение $z(i)$). Оно не совсем удобно для практического применения, т.к. содержит разности больших и близких друг к другу по времени чисел (в том числе и при вычислении невязок ε_i).

Этих недостатков лишен предлагаемый модифицированный алгоритм:

$$x_i = x_{i-1} + 4 \left[\frac{4}{i} \varepsilon_i - 6 \left(\frac{5}{i} - \frac{3}{i-1} \right) \varepsilon_{i-1} + 12 \left(\frac{5}{i} - \frac{5}{i-1} + \frac{1}{i-2} \right) \varepsilon_{i-2} - \left(\frac{35}{i} - \frac{45}{i-1} + \frac{15}{i-2} - \frac{1}{i-3} \right) \varepsilon_{i-3} \right], \quad i = 4, 5, \dots, n, \quad x_1 = x_2 = x_3 = 0,$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \tau \sum_{k=1}^i (i+1-k) \Delta N(k), & i = 1, 2, 3, \\ \tau [\Delta N(i) - \Delta N(i-1)] - x_{i-1} + 3(\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i-2}) + \varepsilon_{i-3}, \text{ при } |\Delta N(i) - \Delta N(i-1)| \leq \Delta_{\text{дон}}, & i = 4, \dots, n, \\ 0 & \text{при } |\Delta N(i) - \Delta N(i-1)| > \Delta_{\text{дон}}, \quad i = 4, 5, \dots, n, \\ 0 & i = n+1, n+2, n+3 \end{cases}$$

Так же, как и выше, перейдем от модели (7) к симметричному полиному

$$Z(t) = b_0 + b_1(t-t_0) + b_2(t-t_0)^2 + b_3(t-t_0)^3 + \xi.$$

Для определения коэффициентов b_0, \dots, b_3 имеем систему $b_0 + b_1 i\tau + b_2 (i\tau)^2 + b_3 (i\tau)^3 = y_i, \quad i = n, n+1, n+2, n+3,$ решая которую, получим в частности:

$$b_2 = \frac{1}{4\tau^2} \left[-(n+3)x_{n+3} + 2 \sum_{k=1}^{n+2} x_k \right], \quad b_3 = \frac{1}{6\tau^3} x_{n+3}.$$

Величина средней за время T измерений угловой скорости находится в данном случае из выражения $W = 2b_2 - 3b_3\tau.$

В четвертой главе приводятся результаты математического эксперимента, лабораторных испытаний и реализации инклинометра забойной телеметрической системы на базе ТВГ. Математический эксперимент выполнялся с целью выявления наиболее эффективного с точки зрения оценки точностных параметров дрейфа ТВГ одного из двух разработанных в третьей главе алгоритмов определения параметров трендов моделей выходного сигнала. Для сравнительного анализа оценка дрейфа была выполнена также по методу

классического среднего (рис. 4). Исходный массив информации, состоящей из количества импульсов компенсации за время такта опроса равное одной секунде, разбивался на исследуемые 30-ти секундные интервалы.

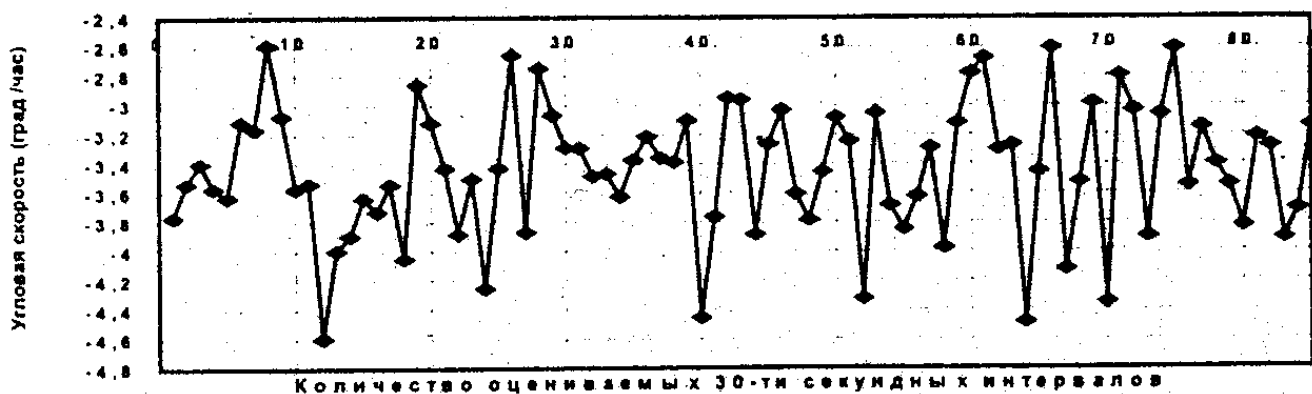


Рис 4. Определение дрейфа ТВГ по формулам классического среднего

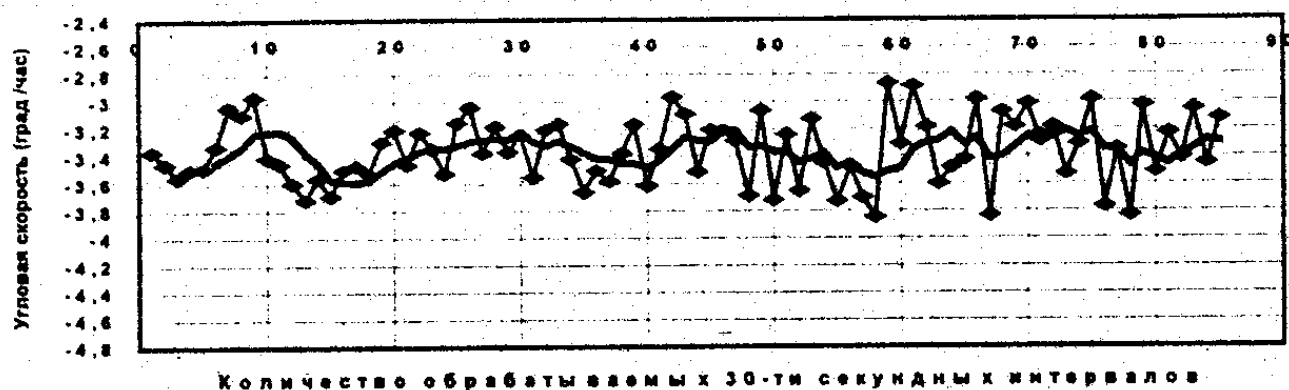


Рис 5. Определение дрейфа ТВГ с использованием алгоритма на основе методики линейно-разностных уравнений для прогнозирующих фильтров

Для сравнения на рис. 5 приводятся результаты оценки исходной экспериментальной выборки для случая двойной интегральной коррекции на основе метода линейно-разностных уравнений для прогнозируемых значений (толстой линией показан результат осреднения массива по шести точкам). Оценка результатов эксперимента показывает, что последний алгоритм является оптимальным как с точки зрения использования ресурсов применяемого микропроцессора, так и исходя из конечной задачи повышения точности угловой ориентации инклинометра.

Лабораторные испытания проводились для оценки полученных во второй главе математической модели и алгоритма определения угловой ориентации инклинометра с использованием параметров Эйлера-Крылова. При этом использовались показания чувствительных элементов опытного образца

инклинометра: трех ТВГ со случайной составляющей дрейфа 0,1 град/час и трех акселерометров с точностью $10^{-3}g$. Достигнутая точность определения угловой ориентации азимутального, визирного и зенитного углов находится в допустимых пределах, что свидетельствует о приемлемости разработанного алгоритма.

В результате реализации разработанного в первой главе датчика ТВГ, а также на основе данных математического моделирования, полученных во второй и третьей главах, разработан инклинометр забойной телеметрической системы. Блок чувствительных элементов ТВГ показан на рисунке 6.



Рис. 6. Общий вид и основные элементы гироскопического блока инклинометра

Выводы

1. Предложен алгоритм функционирования электронных систем твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) с включением системы импульсного подавления квадратурных колебаний резонатора в единый рабочий цикл. Реализация способа импульсной балансировки, включенной в состав общего цикла управления, не требует сложной системы электродов коррекции и отличается простотой схемотехнических решений. Применение предложенного алгоритма функционирования электронных систем управления ТВГ позволило в два раза уменьшить габаритные размеры и потребляемую мощность прибора.

2. На основе классического решения, с использованием параметров Эйлера-Крылова разработаны математическая модель и алгоритм угловой ориентации гироскопического инклинометра с учетом перекосов осей чувствительности датчиков и не идентичности их электрических параметров.

Для ограниченного диапазона углов ориентации инклинометра забойной телеметрической системы (ЗТС) выполнен расчет его искомым углов ориентации на основании реальных данных с чувствительных элементов. Погрешность определения угловой ориентации (6σ) составила $0,52^{\circ}$ для визирного угла, $0,19^{\circ}$ – для зенитного угла и $0,92^{\circ}$ для азимутального угла. Достигнутая точность вычисления угловой ориентации инклинометра находится в допустимых пределах.

3. Разработан алгоритм определения ориентации гироскопического инклинометра на основании одной из фундаментальных теорем алгебры кватернионов. Алгоритм не требует контроля за угловым положением исследуемого инклинометра.

4. Для варианта однократного осреднения выходного сигнала ТВГ робастный алгоритм Хубера модернизирован таким образом, чтобы учесть специфику выходной информации ТВГ. Разработанная модель и алгоритм позволили уменьшить случайную составляющую дрейфа ТВГ, по сравнению с методом классического среднего на 10% , при времени измерения 30 секунд.

5. Для оценки коэффициентов тренда модели выходного ТВГ в виде полинома третьей степени методом линейно-разностных уравнений для прогнозирующих фильтров, разработан удобный для реализации на ЭВМ, полностью рекуррентный, и не содержащий разности близких по величине больших чисел, алгоритм. Он позволил при времени измерения 30 секунд, уменьшить на 30% случайную составляющую дрейфа ТВГ по сравнению с методом классического среднего, реализовать оценку параметров тренда модели выходного сигнала ТВГ на базе скважинного микропроцессора M68000 и в шесть раз уменьшить используемую оперативную память по сравнению с модернизированным алгоритмом Хубера.

Работы автора

1. Бодунов Б.П., Бодунов С.Б. Особенности разработки ТВГ для геофизики// Совместная научная сессия Секции навигационных систем и их чувствительных элементов и С.-Петербургской секции прецизионной гироскопии на тему «Волновой твердотельный гироскоп (ВТГ)»: Тез. докл. – Гироскопия и навигация. – 2001. – № 3 – С. 125 – 126.

2. Бодунов Б.П., Бодунов С.Б., Лопатин В.М., Чупров В.П. Разработка и испытание волнового твердотельного гироскопа для использования в инклинометрической системе// VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Тезисы доклада – Гироскопия и навигация.–2001. – № 2. С.121.
3. Бодунов Б.П., Бодунов С.Б., Лопатин В.М., Чупров В.П. Разработка и испытание волнового твердотельного гироскопа для использования в инклинометрической системе// Гироскопия и навигация. – 2001. – № 3. – С.74– 82.
4. Бодунов С.Б., Гинзбург Р.Е., Лысов А.Н. Применение кватернионов для определения угловых параметров скважины с помощью гироскопических инклинометров// Депонировано в ВИНТИ 19.10.01 № 2188.- В2001. – М.: ВИНТИ, 2001. – 5 с.
5. Бодунов С.Б., Гинзбург Р.Е., Лысов А.Н., Шерстобитова Н.А. Алгоритмы фильтрации выходной информации с чувствительных элементов гироскопических инклинометров// Депонировано в ВИНТИ 19.10.01 №2189. – В2001. – М.: ВИНТИ, 2001. – 9 с.
6. Ковшов Г.Н., Бодунов С.Б.. Гироинклинометр для измерения при бурении// Совместная научная сессия Секции навигационных систем и их чувствительных элементов и С.-Петербургской секции прецизионной гироскопии по теме: «Скважинная навигация, инклинометрия и автоматизация.»: Тез. докл. – Гироскопия и навигация. – 1999. – №. 3. – С.75.
7. Bodunov B.P., Lopatin V.M., Bodunov S.B., Gyroinclinometer for surveying during the drilling process// Symposium Gyro Technology 1999, pp. 11.0 – 11.9.
8. Bodunov B.P., Bodunov S.B., Lopatin V.M., Chuprov V.P. Development and test of the hemispherical resonator gyro for inclinometer system. 8th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. – 2001. pp.60 – 66.
9. Бодунов С.Б., Шерстобитова Н.А. Программа обработки выходной информации чувствительных элементов с применением робастного метода Хубера// № ОФАП – 2116, № госрегистрации – 50200200501 от 22.08.2002.
10. Бодунов С.Б., Шерстобитова Н.А. Программа обработки выходной информации чувствительных элементов в реальном масштабе времени// № ОФАП – 2140, № госрегистрации – 50200200533 от 7.10.2002.

