

УДК 681.518

## ГИБРИДНЫЕ МНОГОСЕВЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

С.А. Синютин

Предлагается использование разнородных многоосевых акселерометров с формированием согласованного решения с помощью фильтра Калмана. Датчики разного типа позволяют взаимно компенсировать инструментальные погрешности.

**Ключевые слова:** акселерометр, датчик угловой скорости, фильтр Калмана, навигация, БИНС, температура

### Введение

В настоящее время получили быстрое развитие системы комбинированной навигации (спутниковая система навигации и инерциальная). Спектр применений таких навигационных систем смещается в сторону все более массовых применений (например навигация автомобилей), и доминирующую роль в таких системах начинает играть стоимость датчиков. Стоимость полноценного изделия с комбинированной навигационной системой приближается к 20 тысячам рублей, соответственно инерциальные датчики должны иметь стоимость по крайней мере в 3-4 раза меньше.

### Анализ требований к датчикам систем инерциальной навигации

Анализ рынка инерциальных датчиков, даже с учетом перспективы, показывает, что в ближайшее время разработчики массовых комбинированных навигационных систем будут ориентироваться на МЭМС датчики. Эти датчики имеют неоспоримые достоинства:

Малые размеры (до 4x4 мм);

Интегральное исполнение (до 6-9 датчиков в одном корпусе);

Малую стоимость \$10 и менее.

На рисунке 1 показаны достигнутые уровни качества акселерометров, выполненных по различным технологиям, а также требования, предъявляемые к их дрейфу различными областями применения.

На рисунке 2 показаны достигнутые показатели дрейфа смещения и коэффициента преобразования для датчиков угловой скорости (ДУС). На этом же рисунке показаны технологические ниши ДУС, а также требования к качеству для решения навигационных задач.

Из приведенных данных видно, что для применения дешевых датчиков в навигационных системах необходимо улучшить их пара-

метры в сотни раз. Самой тяжелой проблемой дешевых датчиков является их дрейф.

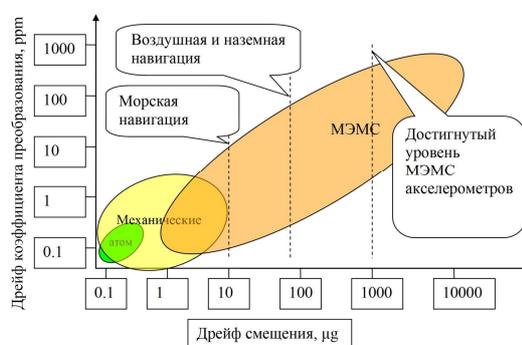


Рисунок 1 – Показатели качества акселерометров.

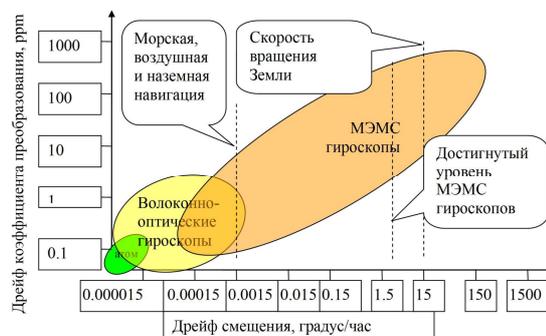


Рисунок 2 – Показатели качества датчиков угловых скоростей.

### Метод уменьшения дрейфа смещения нуля в датчиках систем инерциальной навигации

Интересные методы уменьшения дрейфа инерциальных МЭМС датчиков приведены в [1,2]. В основе этих методов лежит использование некоторого избыточного количества однородных датчиков, развернутых по осям на некоторый угол. Показано, что для избыточности в 2-3 раза можно улучшить показатели дрейфа на порядок. Дальнейшее увеличение количества датчиков затруднено

## РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

вследствие трудностей при определении ковариационных матриц погрешностей многомерной системы датчиков.

Рассмотрим, какие параметры датчиков приводят к существующим показателям дрейфа. Для МЭМС акселерометров и гироскопов это уровень шума. Действительно, уровень шума для современного МЭМС акселерометра составляет примерно 1 мг. При диапазоне  $\pm 5g$ , динамический диапазон акселерометра по ускорению составит 60 дБ. Для решения задач навигации необходимо добиться динамического диапазона 100 дБ.

Для решения этой задачи можно воспользоваться структурно-неоднородным решением при построении информационно избыточного датчика. Часть датчиков изготавливается по технологии, обеспечивающей необходимый динамический диапазон, но, возможно, не обеспечивающей всех остальных параметров. Для акселерометров были применены пьезоэлектрические акселерометры на основе биморфной структуры. Этот тип акселерометров позволяет получить динамический диапазон до 120 дБ, однако он не работает на нулевой частоте, т.е. при постоянном ускорении. Конкретный инерциальный датчик предназначался для автомобиля. Экспериментальное исследование амплитудно-частотного распределения ускорений показало, что длительных (более 20 секунд) малых ускорений крайне мало (менее 1%). Современные операционные усилители позволили получить нижнюю частоту входного усилителя пьезодатчика 0.1 Гц.

Сигналы МЭМС акселерометра и пьезоэлектрического акселерометра объединяем с помощью фильтра, как показано на рисунке 3.

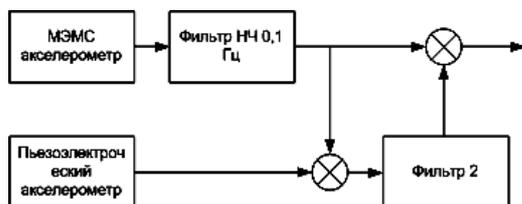


Рисунок 3 – Схема выработки согласованного решения.

Назначение фильтра 2 – подавление помехи МЭМС акселерометра, при минимальном искажении помехи пьезоэлектрического акселерометра.

### Вид сигнала на выходе датчика в частотной области

Если на комбинированный датчик действует ускорение  $x(t)$ , то в частотной области сигнал на выходе датчика будет:

$$y(s) = x(s) + [1 - F(s)]n_m(s) + F(s)n_a(s),$$

где:

$n_m(s)$  - спектр помехи МЭМС акселерометра,

$n_a(s)$  - спектр помехи пьезоэлектрического акселерометра,

$F(s)$  - передаточная функция фильтра 2.

Фильтр НЧ 0.1 Гц дополнительно уменьшает шум МЭМС акселерометра. Если исходная полоса МЭМС акселерометра составляет 2-3 кГц, то после фильтра она сокращается в 20000-30000 раз, что позволяет уменьшить шум в 140-170 раз. Практически МЭМС акселерометр работает вблизи нулевой частоты, т.е. там, где не может работать пьезоэлектрический акселерометр.

### Характер погрешностей комбинированного датчика системы инерциальной навигации

Дополнительное уменьшение инструментальных погрешностей комбинированного датчика происходит вследствие того, что с ростом температуры чувствительность пьезоэлектрического датчика уменьшается, а у МЭМС датчика – увеличивается. Дальнейшее улучшение характеристик комбинированного датчика возможно при использовании адаптивного фильтра, например, фильтра Калмана.

### Адаптивный фильтр Калмана для датчика системы инерциальной навигации

Классический фильтр Калмана строится на модели процесса и модели измерений

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1}x_k + w_k \quad (1)$$

$$z_{k+1} = H_k x_k + v_k, \quad (2)$$

где

$x_k$  - вектор состояния

$w_k$  - шум процесса

$z_k$  - вектор измерений

$v_k$  - шум измерений

Вектора  $w_k$  и  $v_k$  представляют собой гауссовский белый шум с нулевой взаимной корреляцией компонент векторов:

$$E[w_k, w_i^T] = \begin{cases} Q_k, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (3)$$

$$E[v_k, v_i^T] = \begin{cases} R_k, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (4)$$

ГИБРИДНЫЕ МНОГОСЕВЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

$$E[w_k, v_i^T] = \{0, \text{ для всех } i \text{ и } k$$

где  $Q_k$  - ковариационная матрица шумов процесса

$R_k$  - ковариационная матрица шумов измерений

$\Phi_k$  - передаточная функция вектора состояния

$\Phi_k = e^{F\Delta t}$ ,  $\Delta t$  - интервал дискретизации

$E[\ ]$  - представляет процедуру математического ожидания, а индекс Т означает транспонирование матрицы.

Дискретная форма фильтра Калмана состоит из периодического повторения двух этапов:

Этап предсказания:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi_{k+1} \hat{x}_k \quad (5)$$

$$P_{k+1} = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (6)$$

Этап коррекции:

$$K_k = P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k] \quad (8)$$

$$P_k = [I - K_k H_k] P_k \quad (9)$$

Ограничение применения классического фильтра Калмана для решения практических задач состоит в том, что для его эффективной работы требуются априорные знания статистик случайных ошибок и процесса и измерений. Практически это очень сложно сделать, поэтому для проектирования программного обеспечения комбинированного датчика была применена схема адаптивного фильтра Калмана, где одновременно уточняются вектор состояния и ковариационная матрица ошибок измерений.

Из текущего измерения  $z_k$  и оптимального предсказания  $\hat{x}_k$ , полученного на предыдущем шаге, можно определить

$$v_k = z_k - \hat{z}_k \quad (10)$$

Здесь  $v_k$  характеризует разность между предыдущим измерением  $H_k \hat{x}_k$  и новым измерением  $z_k$ . Весовое изменение  $K_k [z_k - H_k \hat{x}_k]$  действует как коррекция предварительной оценки  $\hat{x}_k$ . Подставляя 2 в 10, получим:

$$v_k = H_k (x_k - \hat{x}_k) - v_k \quad (11)$$

Полученный вектор представляет Гауссовский белый шум с нулевым средним. Вычисляя вариации от обеих частей, получим теоретическую ковариацию

$$C_{v_k} = E[v_k v_k^T] = H_k P_k H_k^T + R_k \quad (12)$$

Определяя  $\hat{C}_{v_k}$  как статистическую оценку  $C_{v_k}$ , матрицу  $\hat{C}_{v_k}$  можно вычислить путем усреднения  $v_i$  в скользящем окне размера N:

$$\hat{C}_{v_k} = \frac{1}{N} \sum_{j=j_0}^k v_j v_j^T \quad (13)$$

Размер окна подбирается экспериментально, из опыта получены для N значения 20-50. Из оценки (13) можно оценить

$$\hat{R}_k = \hat{C}_{v_k} - H_k P_k H_k^T \quad (14)$$

Оценка шума процесса

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=j_0}^k \Delta x_j \Delta x_j^T + P_k - \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^T \quad (15)$$

где  $\Delta x_k = x_k - \hat{x}_k$ .

Далее 15 можно переписать как:

$$\hat{Q}_k = K_k \hat{C}_{v_k} K_k^T \quad (16)$$

Выражение для адаптивного фильтра

$$P_{k+1} = \lambda_k \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (17)$$

$$\lambda_k = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)$$

Параметр  $\lambda_k$  сильно влияет на сходимость фильтра. Значения  $\lambda_k$ , большие 1, как правило, приводят к расходящемуся решению. Поэтому  $\lambda_k$  необходимо перенормировать на каждом шаге коррекции.

$$\lambda_k = \max \left\{ 1, \frac{\alpha}{n} \text{tr} [N_k M_k^{-1}] \right\}$$

$\text{Tr}[\ ]$  - представляет собой след соответствующей матрицы.

$$M_k = H_k \Phi_k P_k \Phi_k^T H_k^T \quad (18)$$

$$N_k = \gamma C_0 - R_k - H_k Q_k H_k^T \quad (19)$$

$$C_0 = \begin{cases} \frac{v_0 v_0^T}{2}, & k = 0 \\ \left[ \frac{\lambda_k v_k v_k^T}{1 + \lambda_k} \right], & k \geq 1 \end{cases} \quad (20)$$

Адаптивная фильтрация представляет собой периодическое применение выражений 17-20.

## РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

### Макетирование комбинированного датчика системы инерциальной навигации

Макет комбинированного акселерометра был построен на базе МЭМС акселерометра LSM303DLH и оригинального пьезоэлектрического акселерометра на основе биморфа диаметром 35 мм.

Пьезоэлектрический акселерометр показан на рисунке 4, а макет комбинированного инерциального датчика (пьезоэлектрический плюс трехосевой МЭМС датчик) – на рисунке 5.



Рисунок 4 – Пьезоэлектрический акселерометр.

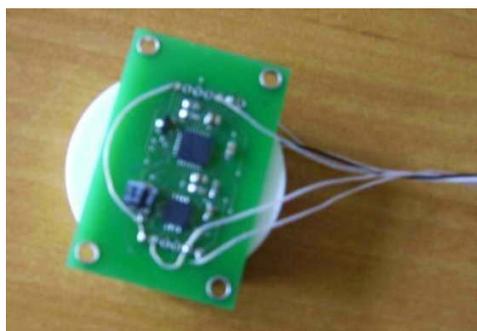


Рисунок 5 – Макет комбинированного инерциального датчика.

Усилитель пьезоэлектрического акселерометра был выполнен на базе операционного усилителя AD8606 фирмы Analog Devices.

На специальном стенде были размещены три комплекта датчиков, с осями, развернутыми в плане и относительно вертикали на 30 градусов. В [1], показано, что оптимальным является угол 57 градусов, но на макете более технологичным решением было применение более малого угла (при угле 57 градусов размеры датчика превышали габариты площадки крепления).

Для взаимодействия с датчиком была разработана программа на Delphi, которая отображает текущие параметры, ошибки, а так же ковариационные матрицы и вектр состояний. Окно программы показано на рисунке 6.

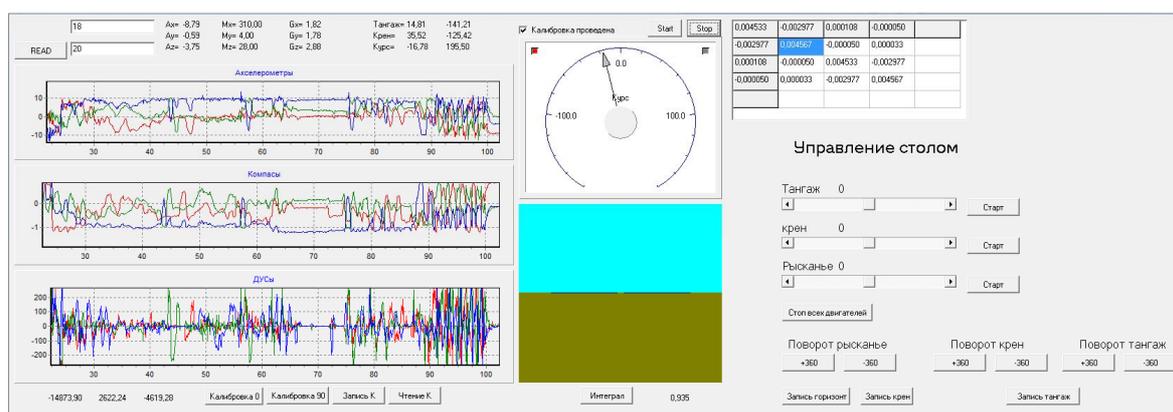


Рисунок 6 – Окно программы диалога с макетом

### Выводы

В результате разработки комбинированного многоосевого датчика для системы инерциальной навигации были определены основные требования к датчикам такого типа для массовых применений, выбран подход, позволяющий на порядок и более уменьшить

дрейф основных параметров. Макетирование датчика показало, что выбранные решения позволяют на достигнутом технологическом уровне МЭМС и пьезоэлектрических технологий разрабатывать точные и относительно не дорогие датчики для комбинированных навигационных систем массового применения.

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ТРУБ

Результаты исследований изложенные в данной статье получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению информационно-телекоммуникационных комплексов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS/Galileo" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешкин М.В. Математические модели, методы и алгоритмы обработки избыточной ин-

формации измерительного блока / В.В. Алешкин, А.С. Матвеев, М.В. Алешкин // Интернет и инновации: сб. трудов Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2008. С. 377-380.

2. Водичева Л. В. Повышение надежности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерений // Гироскопия и навигация. 1997. № 1. — С. 55-67.

**Синютин С.А.**, к.т.н., доцент, тел.: (8634) 311-143, e-mail: [ssin@mail.ru](mailto:ssin@mail.ru), Научно-технический центр "Техноцентр" Южного федерального университета

УДК 531.717.86

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ТРУБ

Е.В. Якимов, А.Е. Гольдштейн, Д.В. Вахрушев

В работе описан метод контроля отклонения от прямолинейности трубы. Предложены принципы построения системы контроля прямолинейности труб и конструкция измерительного блока. Основные технические и конструктивные решения заимствованы из системы контроля соосности тела трубы и приваренного замка, поскольку оба метода основаны на измерении биений в сечении трубы.

**Ключевые слова:** бурильные трубы, приваренные замки, отклонение от прямолинейности, кривизна, соосность, система контроля

### Постановка задачи

При выполнении бурильных работ большую роль играет качество применяемых бурильных труб. Помимо механической прочности материала трубы надежность зависит от соосности стыкуемых труб, которая определяется геометрией самой трубы и применяемых способов соединения.

Ведущее место в обширной номенклатуре бурильных труб занимают трубы стальные с приваренными замками. Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением.

Ранее в работах [1, 2] был рассмотрен метод контроля соосности тела трубы и приваренного замка, а также принципы построения системы для измерения несоосности на основе контактных и бесконтактных преобразователей. Однако не меньшее значение имеет отклонение от прямолинейности тела трубы, поскольку оно вызывает не только биение буровой колонны в стволе скважины во время бурения, но и несоосность при сварке замка и тела трубы, что также увеличивает биения.

В соответствии с [3] кривизну (отклонение от прямолинейности) отдельных участков трубы проверяют поверочной линейкой по

ГОСТ 8026 длиной  $A$ , равной 1000 мм, и набором щупов, рисунок 1.

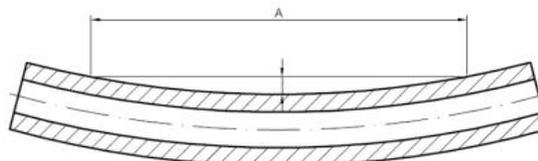


Рисунок 1 – Измерение отклонения от прямолинейности

Для измерения визуально выбирают участок трубы с максимальной кривизной и определяют стрелу прогиба, т.е. радиальное биение  $\delta$ . Кривизну на всей длине контролируют измерительной линейкой и натянутой струной (леской), прикладываемой к наружной поверхности концов трубы (исключая приваренные замки).

Кривизна трубы не должна превышать 1 мм на длине 1 м на любом участке. Общая кривизна, измеренная в середине трубы, не должна превышать  $1/2000$  ее длины.

### Система контроля прямолинейности

Описанный метод контроля отклонения от прямолинейности очень близок к методу контроля несоосности приваренного замка и тела трубы, поскольку в обоих случаях изме-