

э л е к т р о н н ы й ж у р н а л

МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Цифровая обработка выходного сигнала лазерного гироскопа с виброподставкой.

10, октябрь 2012

Санеев И. В.

УДК 004.942

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

saneevil@mail.ru

Введение

В большинстве современных высокоточных систем ориентации и навигации используются лазерные гироскопы (ЛГ). Автономное определение начальной угловой ориентации таких систем («выставка») обеспечивается на неподвижном объекте путем измерения проекций вектора угловой скорости вращения Земли с помощью ЛГ и силы тяжести с помощью акселерометров относительно базовых поверхностей [2].

Однако, в реальных условиях эксплуатации вибрации основания препятствуют точному измерению малых угловых скоростей за ограниченный интервал наблюдения.

В настоящей работе в среде программирования Mathematica Wolfram Research исследуются сравнительные характеристики нескольких типов цифровых фильтров, предназначенных для подавления помех на выходе ЛГ, существенно превосходящих по величине полезный сигнал.

Математическая модель вибраций

Для исследования сравнительных характеристик фильтров ЛГ принят идеальным, измеряемая постоянная угловая скорость равна $10^\circ/\text{час}$, а угловая вибрация основания прибора представлена в виде суммы гармоник

со случайными амплитудами и частотами, в определенном диапазоне значений.

В качестве примера характеристики вибраций основания выбраны следующими: частота имеет диапазон от 7 до 250 Гц. Спектральная плотность линейного ускорения растет в диапазоне от 7 до 30 Гц, затем, до частоты 200 Гц, её можно считать равномерной, выше начинается спад. В среднем, в диапазоне от 7 до 250 Гц, спектральная плотность линейного ускорения принята равной $0.04 \text{ g}^2/\text{Гц}$ при общей среднеквадратичной величине ускорения около 3g . Для пересчета линейного ускорения в угловое, в качестве среднего плеча преобразования принято плечо, длиной 0.4 м. В этом случае средняя спектральная плотность углового ускорения вибраций основания равна $6.3 \text{ }^\circ/\text{сек}^2/\text{Гц}$ при среднеквадратичной величине угловой скорости $27 \text{ }^\circ/\text{сек}$.

В чувствительном элементе ЛГ угол поворота основания преобразовывается в разность набега фаз встречных волн двулучевого кольцевого лазера. В фазовом детекторе эта разность набега фаз преобразуется в цифровой вид, и с тактом, равным периоду виброподставки (2.5 мс), выдается на выход чувствительного элемента прибора.

Отношение величины разности набега фаз встречных волн в кольцевом лазере к углу поворота чувствительного элемента в инерциальном пространстве назовем коэффициентом усиления ЛГ и обозначим K_u . Но выходной сигнал ЛГ цифровой, т.е. дискретный, и поэтому вместо K_u используется понятие масштабного коэффициента МК, равного отношению угла поворота (в угловых секундах) к количеству импульсов, содержащихся в выходном цифровом сигнале. Для типового $\text{МК}=0.6 \text{ }^\circ/\text{имп.}$ при чувствительности детектора, равной 2, $K_u = 1080000$.

Цифровой сигнал с выхода чувствительного элемента ЛГ подается на вход фильтра для подавления шумовых составляющих, вызванных угловыми вибрациями и другими причинами.

На рисунке 1 и рисунке 2 показаны графики выходного сигнала ЛГ, измеряющего постоянную угловую скорость $10^\circ/\text{час}$ при наличии описанных выше помех, до обработки цифровым фильтром.

Пунктиром выделено показание идеального ЛГ без помех.

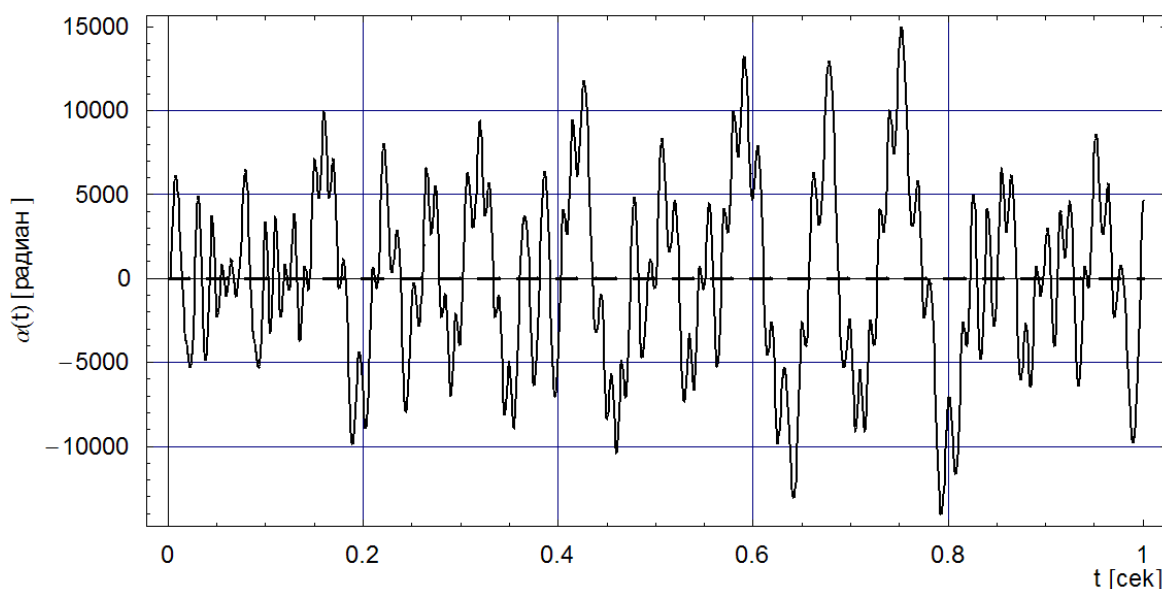


Рисунок 1. – Вид выходного сигнала ЛГ при измерении угловой скорости $10^\circ/\text{час}$ в условиях вибраций за одну секунду наблюдений.

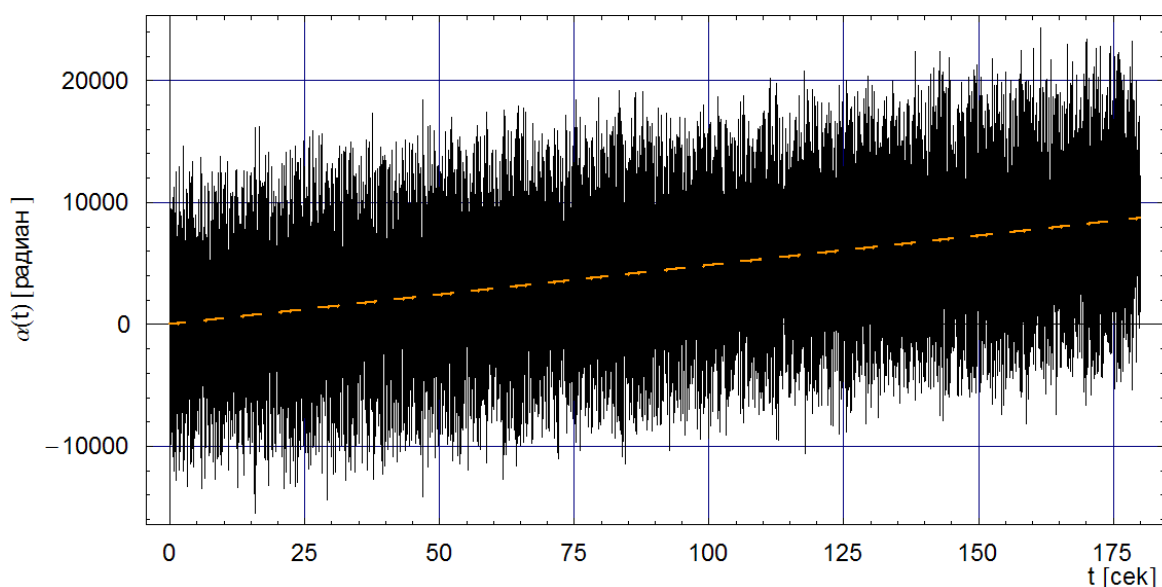
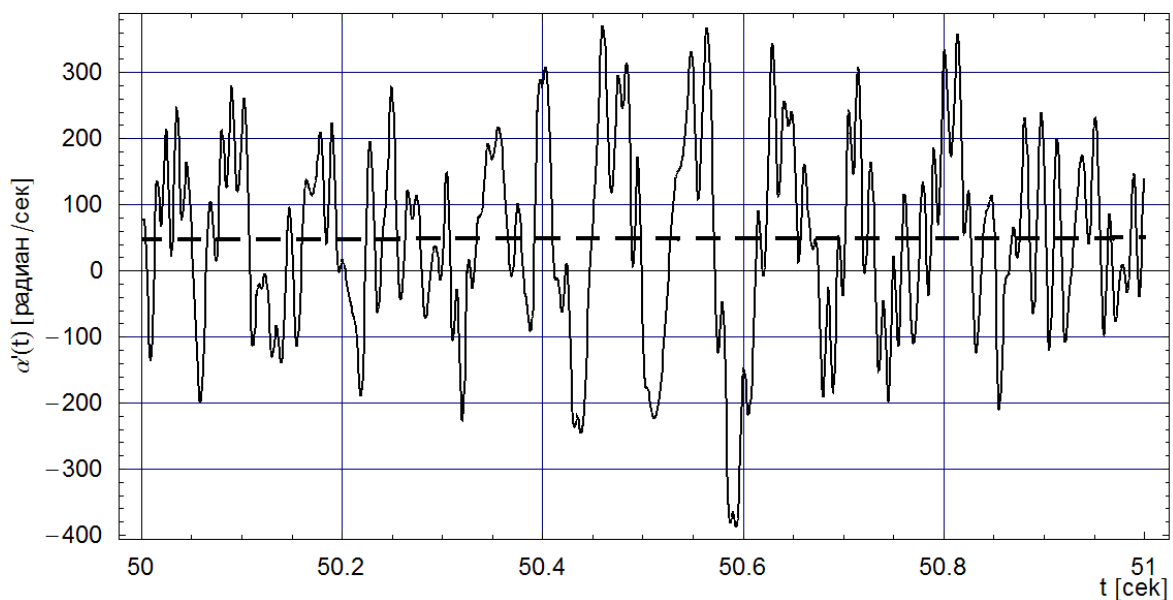


Рисунок 2. – Вид выходного сигнала ЛГ при измерении угловой скорости $10^\circ/\text{час}$ в условиях вибраций за три минуты наблюдений.

На рисунке 1 и рисунке 2 выходной сигнал представлен в виде зависимости угла (разность набега фаз) от времени. В некоторых случаях целесообразно представить выходной сигнал в виде угловой скорости. Такой сигнал получают расчетным путем, на каждом такте вычисляется разность значений угловых данных, отстоящих друг от друга на равных интервалах времени. Этот интервал времени обозначим $T_{\text{уск}}$. $T_{\text{уск}}$ может принимать значения в широком диапазоне от одного такта (0.025 сек) до интервала, равного времени всего наблюдения. Если $T_{\text{уск}}$ равно времени наблюдения, то выходной график будет иметь одну точку. При $T_{\text{уск}}$, равном 50 секунд, выходной график будет иметь на 20000 ($400 \cdot 50$) точек меньше, чем график выходного сигнала в виде углов.



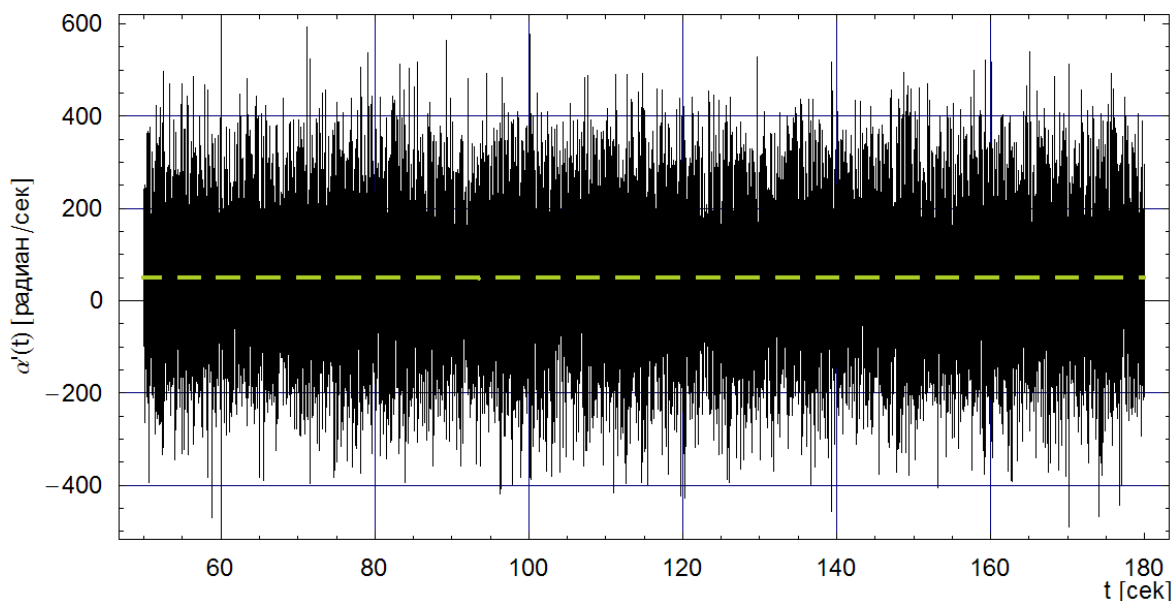


Рисунок 4. – Графики зависимости расчетной угловой скорости на выходе ЛГ с периодом расчета разностей, равным 50 сек, при наблюдении в течение 3 минут.

На рисунке 3 и рисунке 4 пунктиром выделено показания идеального прибора в условиях без помех.

Сравнительный анализ различных методов обработки

Выберем следующие типы фильтров для проведения исследования их сравнительных характеристик:

фильтр Баттерворта четвертого порядка, обрабатывающий выходной сигнал в виде угловой скорости (рисунок 3 и рисунок 4);

фильтр, использующий алгоритм расчета скользящей средней угловой скорости (рисунок 3 и рисунок 4);

фильтр, построенный на линейной регрессии, обрабатывающий выходной сигнал в виде угла (рисунок 1 и рисунок 2);

Нормированные полиномы Баттерворта с единичной круговой частотой среза $\omega_c=1$ имеют вид [5, 6]:

$$B_n(s) = \prod_{k=1}^{\frac{n}{2}} \left[s^2 - 2s \cos \left(\frac{2k+n-1}{2n} \pi \right) + 1 \right], \quad \text{для } n - \text{четного}$$

$$B_n(s) = (s + 1) \prod_{k=1}^{(n-1)/2} \left[s^2 - 2s \cos \left(\frac{2k+n-1}{2n} \pi \right) + 1 \right], \quad \text{для } n -$$

нечетного.

Выполнив над передаточной функцией фильтра четвертого порядка Z-преобразование:

$$[1/B_n(s)]/s \rightarrow \left(\frac{2(1-Z)}{T \cdot \omega_c \cdot (1+Z)} \right),$$

определяем коэффициенты цифрового вида фильтра Баттерворта с бесконечно импульсной характеристикой (БИХ). Коэффициенты цифрового БИХ-фильтра Баттерворта пересчитываются для разных значений T и ω_c , точнее для разных значений произведения $T \cdot \omega_c$.

Например, для $T \cdot \omega_c = 1$:

$$a[5] = \{0, -2.7253641, 2.9280332, -1.4436870, 0.27371630\};$$

$$b[5] = \{0.0020436525, \quad 0.00817461, \quad 0.012261915, \quad 0.00817461, \quad 0.0020436525\}.$$

Выходной сигнал БИХ-фильтра Баттерворта на каждом n -ом такте вычисляется по формуле:

$$\Omega_{\text{ВЫХ}}[n] = \sum_{i=0}^{i=4} b[i] \cdot \Omega_{\text{ВХ}}[n - i] + \sum_{i=1}^{i=4} a[i] \cdot \Omega_{\text{ВЫХ}}[n - i]$$

где $\Omega_{\text{ВХ}}[n]$ – входной сигнал фильтра, показанный на рисунок 3 и рисунок 4, а $\Omega_{\text{ВЫХ}}[n]$ – выходной сигнал фильтра.

БИХ-фильтр Баттерворта обрабатывает данные по угловой скорости (рисунок 3 и рисунок 4). Результатом его работы является значение $\Omega_{\text{ВЫХ}}[n]$ для последнего значения n за весь период наблюдения, это значение делится на $K_u = 1080000$ (получается значение «приборной» величины измеряемой угловой скорости) и сравнивается с точным значением измеряемой величины угловой скорости, равной $10^\circ/\text{час}$ и вычисляется отклонение. Затем генерируется следующий график выходного сигнала ЛГ для другой

последовательности случайных чисел и вычисляется значение отклонения «приборного» значения измеряемой угловой скорости от точного значения, равного $10^\circ/\text{час}$.

Для получения среднеквадратичной величины отклонения «приборного» значения измеряемой угловой скорости от точного значения проводится серия вычислительных экспериментов, в которой на вход фильтра подается 300 массивов выходных данных ЛГ по 72000 точек, сгенерированных различными случайными последовательностями.

На рисунке 5.а показан результат расчетов средней квадратичной погрешности измерения угловой скорости $10^\circ/\text{час}$ при $T_{\text{уск}} = 50$ сек, $T = 0.0025$ сек, в зависимости от частоты среза W_c . Результат расчетов показан в $^\circ/\text{час}$.

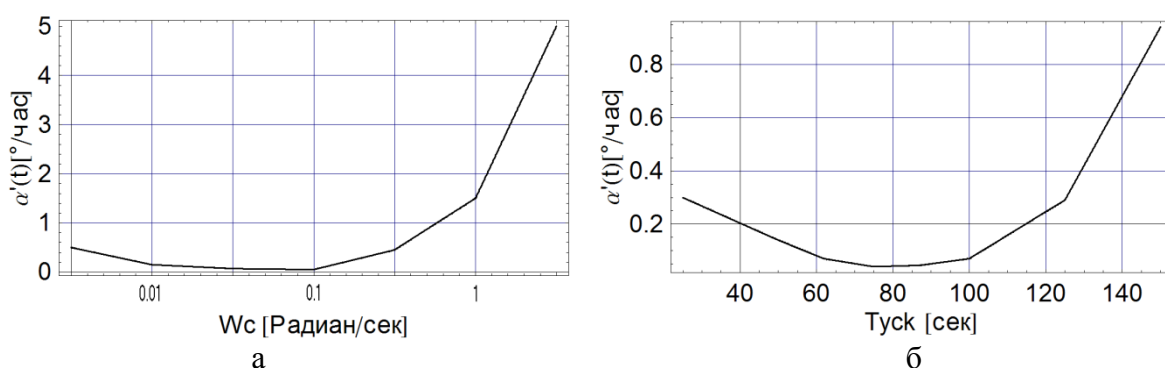


Рисунок 5. – Результаты обработки выходного сигнала ЛГ фильтром Баттерворта.

На рисунок 5.б показан результат расчетов средней квадратичной погрешности измерения угловой скорости $10^\circ/\text{час}$ и $W_c = 0.15$, $T = 0.0025$ сек, в зависимости от $T_{\text{уск}}$. Результат расчетов показан в $^\circ/\text{час}$.

На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что фильтр Баттерворта наиболее эффективно сглаживает угловые вибрации при

$W_c=0.15$ рад/сек и $T_{\text{уск}} = 75$ сек со средней квадратичной погрешностью измерения 0.037 °/час.

Фильтр, использующий алгоритм расчета скользящей средней угловой скорости (рисунок 3 и рисунок 4), дает значение «приборной» угловой скорости:

$$\Omega_{\text{вых}} = (\sum_{i=1}^{i=m} \Omega_{\text{вх}}[i])/m ,$$

где m – количество точек в графике скорости, которое равно $n - T_{\text{уск}} \cdot 400$, где n – количество точек в графике по углу.

Для вычисления среднеквадратичной величины отклонения «приборного» значения измеряемой угловой скорости от точного значения для каждого значения $T_{\text{уск}}$ была проведена серия вычислительных экспериментов, включающая генерацию 300 массивов выходных данных ЛГ различными случайными последовательностями.

В результате получена зависимость среднеквадратичного отклонения измеряемой угловой скорости от $T_{\text{уск}}$, представленная на рисунке 6.

Наилучшее подавление помех фильтр, использующий алгоритм расчета скользящей средней угловой скорости, имеет при $T_{\text{уск}}=94$ сек, а среднеквадратичное отклонение «приборного» значения измеряемой угловой скорости 0.019 °/час.

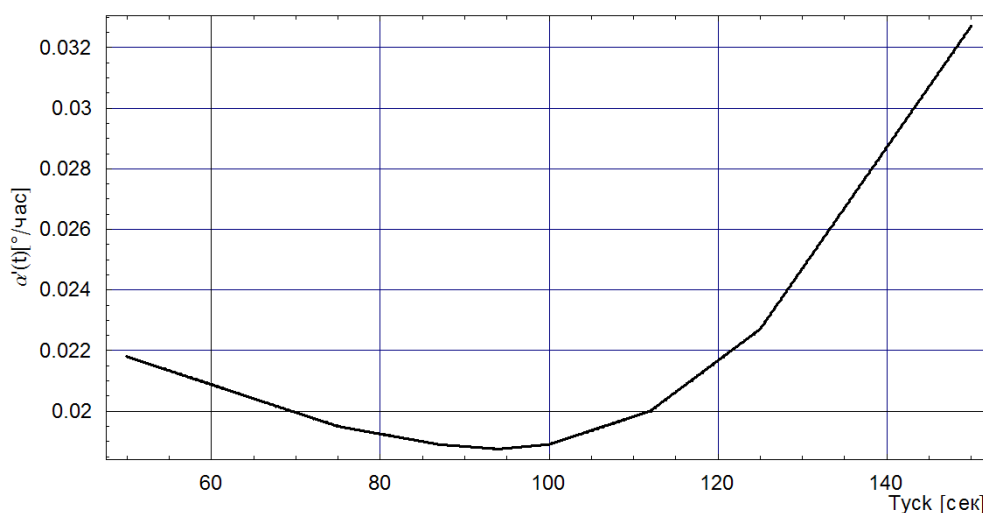


Рисунок 6.–Результат обработки выходного сигнала ЛГ фильтром на базе скользящих средних.

Фильтр, построенный на линейной регрессии, выполняет расчет линии регрессии первого порядка, тангенс угла наклона которой является выходным параметром фильтра. Он равен:

$$\Omega_{\text{вых}} = 6(2Y_i + Y_1 - nY_1)/(n(n-1)(n+1)),$$

где $Y_i = \sum_{i=1}^n (\theta_{\text{вх}}[i] \cdot i)$, $Y_1 = \sum_{i=1}^n \theta_{\text{вх}}[i]$.

а $\theta_{\text{вх}}[i]$ - являются входными данными по углу, представленными на рисунке 1 и рисунке 2.

В результате проведения серии вычислительных экспериментов, включающей генерацию 300 массивов выходных данных ЛГ различными случайными последовательностями, получено среднеквадратичное отклонение «приборного» значения измеряемой угловой скорости, равное 0.003 °/час.

В таблице сведены результаты вычислительных экспериментов с использованием трех способов фильтрации:

Таблица 1. – Результаты вычислительных экспериментов.

Наименование фильтра	Сигма результата измерения угловой скорости	Количество арифметических операций, необходимое на вычисление каждого нового значения «приборной» измеряемой угловой скорости
Фильтр Баттерворта четвертого порядка	0.037 °/час	21
Фильтр, использующий алгоритм расчета скользящей средней угловой скорости	0.019 °/час	68800, при Туск=94 сек.
Фильтр, построенный на линейной регрессии, обрабатывающий выходной сигнал в виде угла	0.003 °/час	216000

Заключение

Сравнивая эффективности фильтрации помех различными фильтрами, можно сделать следующие выводы:

- эффективность фильтрации помех фильтра, построенного на линейной регрессии, значительно превосходит эффективность фильтра, использующего алгоритм расчета скользящей средней угловой скорости и, тем более, фильтра Баттерворта;
- ресурсоемкость фильтра, построенного на линейной регрессии, значительно больше ресурсоемкости фильтра, использующего алгоритм расчета скользящей средней угловой скорости и, тем более, фильтра Баттерворта;
- значительное повышение ресурсоемкости фильтра, построенного на линейной регрессии, не является непреодолимым препятствием на пути использования его в системах обработки информации, если учесть рост возможностей микропроцессоров.

Литература:

1. Бакин Ю.Б., Болотнов С.А., Людомирский М.Б., Алексейченко А.А. Лазерные гироскопы с призмами полного внутреннего отражения. — В сб.: Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007, с. 97 - 104.
2. Болотнов С.А., Вереникина Н.М., Алексейченко А.А. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на лазерных гироскопах. — В сб.: Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007, с. 37 - 42.

3. Гаврилин Б.Н., Чернодаров А.В. Двухуровневая первичная обработка сигналов в лазерных бесплатформенных инерциальных навигационных системах. — Мехатроника, автоматизация, управление №10, 2007.
4. Ароновиц Ф. В. Применения лазеров.— М.: «Мир», 1974.—182 с.
5. Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б. Основы цифровой обработки сигналов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 768 с.: ил.
6. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. — 992 с.
7. Лобусов Е.С. Особенности функционирования и анализ точности бесплатформенной инерциальной навигационной системы в режиме начальной выставки. — Мехатроника, автоматизация, управление №10, 2007.