

К вопросу о выборе цифрового фильтра на выходе лазерного гиromетра в режиме измерения малых постоянных угловых скоростей

© И.В. Санеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Исследованы возможности повышения точности лазерного гиromетра в режиме измерения малых постоянных угловых скоростей путем подавления помех на выходе прибора различными цифровыми фильтрами. При этом рассмотрен случай, когда уровень помех, вызванных вибрационными возмущениями, на несколько порядков превышает уровень измеряемого сигнала. Проведено моделирование работы таких цифровых фильтров, как фильтры Баттерворта и Чебышева II рода с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), фильтра Блэкмана — Наталла с конечной импульсной характеристикой (КИХ), фильтра, построенного на базе робастной селекции прямых линий регрессии, в условиях вибраций. В результате исследования установлено, что в случае достаточной ресурсоемкости микропроцессора наиболее эффективно подавляет помехи фильтр, построенный на базе робастной селекции прямых линий регрессии, что позволяет измерить постоянную малую угловую скорость с приемлемой точностью при интенсивных вибрациях основания, вызванных, например, работой двигателя.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, лазерный гиromетр, цифровая обработка сигнала, цифровые фильтры, робастное оценивание.

Введение. В работе рассматривается задача начальной азимутальной ориентации лазерных систем навигации в условиях вибраций. Особенностью работы лазерного гиromетра (ЛГ) в этих условиях является то, что он измеряет малую постоянную угловую скорость, которая меньше угловой скорости вращения Земли и составляет, например, $12 \text{ }^\circ/\text{ч}$ при требуемой точности измерения $0,002 \dots 0,005 \text{ }^\circ/\text{ч}$ [1–4].

Выходной сигнал ЛГ, работающего в режиме измерения постоянных угловых скоростей, имеет не только постоянную, но и шумовую составляющую, которая может на несколько порядков превышать полезный сигнал. При уровне вибраций $\sim 5 \text{ }^\circ/\text{с}$ шумовая составляющая в 1500 раз больше уровня измеряемого сигнала.

Вопросу обработки выходного сигнала ЛГ в условиях внешних возмущений посвящен ряд работ. В работе [1] путем последовательного включения двух цифровых КИХ-фильтров и одного БИХ-фильтра низких частот получен коэффициент подавления (КП)

109 дБ в диапазоне частот 100 Гц и выше. В работе [2] авторы описывают способ цифровой обработки на базе «корреляционного» фильтра, КП которого составляет 41 дБ, в сочетании с КИХ-фильтром низких частот 22-го порядка. Таким образом, полученные в этих работах результаты как по значению КП, так и по диапазону частот недостаточны для решения задачи измерения постоянной угловой скорости Земли в условиях значительных помех.

На наш взгляд, наиболее эффективным из КИХ-фильтров является КИХ-фильтр Блэкмана — Наталла (окно Блэкмана — Наталла) [5]. Коэффициент подавления КИХ-фильтра Блэкмана — Наталла типовых порядков (от 50-го до 500-го) достигает 98 дБ.

Схемы и способы построения цифровых фильтров, как описанные ранее, так и приведенные в работе [6], не позволяют обеспечить необходимую точность в реальных условиях эксплуатации прибора, т. е. при наличии вибраций основания.

Целью настоящей статьи является разработка способа и схемы цифровой обработки выходного сигнала, позволяющих более эффективно подавлять помехи на выходе ЛГ, обусловленные вибрациями основания прибора.

Математическая модель динамики разности фаз встречных волн в лазерном гиromетре в условиях вибраций основания. Уравнение разности фаз встречных волн с учетом угловых вибраций для ЛГ с моноблоком на торсионном подвесе [7] будет иметь вид

$$\varphi'(t) + \Omega_{\text{ст}} K_{\text{п}} \sin(\varphi(t) + \varphi_0) = (\Omega_{\text{ВП}}(t) + \vartheta(t) + \Omega_{\text{изм}}) K_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ — накопление разности фаз встречных волн с течением времени; $\Omega_{\text{ст}}$ — статическая зона захвата, равная 100 °/ч, или $4,848 \cdot 10^{-4}$ рад/с; $K_{\text{п}}$ — коэффициент передачи кольцевого лазера — отношение скорости накопления разности фаз встречных волн к угловой скорости вращения основания прибора, (рад/с)/(рад/с) (для масштабного коэффициента, равного 1,161"/имп., $K_{\text{п}} = 558\,140$ (рад/с)/(рад/с); φ_0 — начальная разность фаз встречных волн (при моделировании в начальный момент времени имеет случайное значение в диапазоне $-\pi \dots +\pi$); $\Omega_{\text{ВП}}(t)$ — угловая скорость моноблока относительно основания, вносимая виброподставкой, рад/с; $\vartheta(t)$ — угловая скорость, вносимая угловыми вибрациями основания прибора, рад/с; $\Omega_{\text{изм}}$ — измеряемая угловая скорость, т. е. угловая скорость вращения основания прибора, рад/с (при моделировании имеет постоянное, не зависящее от времени значение, например 12 °/ч или $5,818 \cdot 10^{-5}$ рад/с).

Угловая скорость моноблока $\Omega_{\text{ВП}}(t)$ характеризуется номинальным среднеквадратическим значением амплитуды частотной подставки:

$$A_{\text{ВП}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Omega_{\text{ВП}}^2(t) dt} = 25\,456 \text{ }^\circ/\text{ч} = 0,1234 \text{ рад/с},$$

где T — период частотной подставки (при частоте подставки $f_{\text{ВП}} = 400$ Гц период $T = 0,0025$ с).

Угловая скорость $\vartheta(t)$ характеризуется среднеквадратическим значением амплитуды шумов в выходном сигнале прибора, возникающих вследствие угловых вибраций в диапазоне частот $1 \dots 400$ Гц за время проведения измерений $T_{\text{ИЗМ}} = 360$ с,

$$A_{\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ИЗМ}}} \int_0^{T_{\text{ИЗМ}}} \vartheta^2(t) dt} = 5 \text{ }^\circ/\text{с} = 0,0872 \text{ рад/с}.$$

В качестве модели вибраций использована модель, описанная в работе [8] и модифицированная таким образом, что для диапазона частот $1 \dots 400$ Гц спектральная плотность распределения углов является равномерной, при этом амплитуда угловой скорости вибраций равна $5 \text{ }^\circ/\text{с}$.

Пример вибрационного воздействия $\vartheta(t)$ приведен на рис. 1.

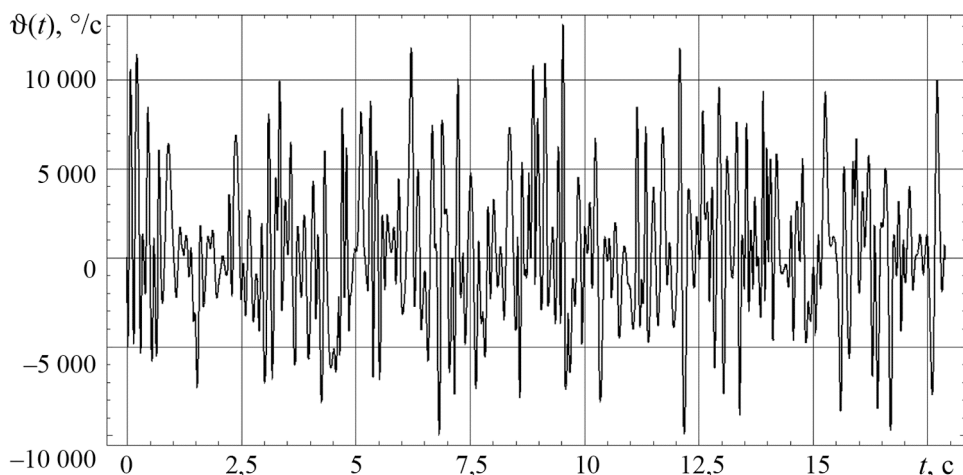


Рис. 1. Вид угловых вибраций $\vartheta(t)$ в частотном диапазоне $1 \dots 400$ Гц с равномерной спектральной плотностью

Оценка требуемой точности моделирования разности фаз встречных волн в кольцевом лазере. Случайная в запуске составляющая современных прецизионных российских ЛГ имеет значение

0,005 °/ч и более, а ЛГ фирмы Litton — 0,001 °/ч и более [3]. Точность математического моделирования динамики разности фаз встречных волн в кольцевом лазере должна быть не ниже точности работы серийных приборов. Отсюда следует, что вычислительный метод решения уравнения лазерного гиromетра должен иметь относительную погрешность $\epsilon(\phi) < (0,001 \text{ °/ч}) / (5 \text{ °/с}) = 5,5 \cdot 10^{-8}$, где ϕ — разность фаз встречных волн.

Для достижения требуемой точности моделирования в среде Mathematica Wolfram Research сначала был получен ряд эталонных решений с точностью на несколько порядков выше требуемой. Затем в более быстродействующем режиме проведен многократный запуск математической модели с различными методами и параметрами интегрирования. Полученные результаты сравнивались с эталонными решениями. Среди предлагаемых средой Mathematica методов были найдены максимальные по быстродействию методы, соответствующие требуемой относительной точности вычислений.

Расчеты проводились на компьютере с процессором Intel Core i7-3630QM 3,4 ГГц (Turbo Boost) с полной загрузкой всех восьми аппаратных потоков как в среде Mathematica, так и в языке программирования C++. При расчете использовался метод, представленный в работе [9], благодаря чему время проведения серий вычислительных экспериментов удалось снизить до нескольких десятков часов.

Вычислительный процесс математических моделей гиromетра, вибраций и фильтров. Определение КП шумов цифровых фильтров (БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева II рода, КИХ-фильтра Блэкмана — Наталла и фильтра, построенного на базе робастной селекции прямых линий регрессии) в выходном сигнале ЛГ, находящегося под воздействием вибраций, выполняется параллельно (одновременно) для обеспечения идентичности условий по сигналам на их входах.

Расчет выходного значения сигнала $\phi(t)$ осуществляется численным решением уравнения разности фаз встречных волн (1) с учетом модели угловых вибраций $\vartheta(t)$ в среде Mathematica Wolfram Research во временном интервале 0...6 мин (360 с) при измеряемой постоянной угловой скорости $\Omega_{\text{изм}} = 12 \text{ °/ч} = 5,818 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$. Значения полученной выходной функции $\phi(t)$ на временных интервалах, кратных периоду частотной подставки (2,5 мс), после приведения к «приборному» выходному значению, т. е. к значению $\phi(t) \cdot 57,3 \cdot 3600 / K_{\text{п}}$, заносятся в массив данных с количеством элементов $f_{\text{ВП}} T_{\text{изм}} + 1 = 400 \cdot 360 + 1 = 144\,001$. Эти значения последовательно подаются на входы всех цифровых фильтров, т. е. зашумленный сигнал с выхода

ЛГ подается одновременно на вход всех четырех цифровых фильтров.

Модель угловых вибраций основания прибора в уравнении (1) с каждым запуском вычислительного эксперимента обновляется. При этом для соблюдения идентичности условий проведения экспериментов среднеквадратическое отклонение (СКО) вибраций обеспечивается постоянным (в данной работе $\text{СКО}_{\text{норм}} = 25\ 456\ \text{°/ч} = 0,1234\ \text{рад/с}$) за счет выполнения следующих операций.

После получения $\vartheta(t)$ вычисляется текущее значение $\text{СКО}_{\text{тек}}$ для полученного массива значений этой функции с интервалом 2,5 мс. Затем все элементы этого массива умножаются на отношение $\text{СКО}_{\text{норм}}/\text{СКО}_{\text{тек}}$.

Каждый i -й вычислительный эксперимент завершается определением разности (Out) между «приборным» значением выходного сигнала, например, первого цифрового фильтра — БИХ-фильтра Баттерворта и точным значением $12\ \text{°/ч}$. Так, значение Out_i равно «приборному» значению сигнала на выходе БИХ-фильтра Баттерворта за вычетом $12\ \text{°/ч}$.

Таким образом, после проведения K экспериментов (в работе K принято равным 40) накапливаются четыре массива значений $\text{Out}_{(1...4)i}$, где $i = 1...K$ для всех фильтров.

Коэффициент подавления помех первым фильтром

$$\text{КП}_1 = \frac{\text{СКО}_{\text{ш}}}{\text{СКО}(\text{Out}_1)},$$

где $\text{СКО}_{\text{ш}}$ — эффективное (действующее) значение шума на выходе гиromетра до подачи на вход какого-либо фильтра; $\text{СКО}(\text{Out}_1)$ — СКО разности выходных значений первого фильтра и точного значения $12\ \text{°/ч}$, $\text{СКО}(\text{Out}_1) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \text{Out}_{1i}$.

Аналогично вычисляется КП и для других фильтров.

Амплитудно-частотные характеристики БИХ-фильтров Баттерворта и Чебышева II рода и КИХ-фильтра Блэкмана — Наталла, оптимизация параметров. Нормированные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) цифровых фильтров представлены на рис. 2.

В диапазоне подавления фильтр Баттерворта имеет гладкую равномерно спадающую характеристику. Фильтры Чебышева II рода и Блэкмана — Наталла [6] в диапазоне подавления не имеют монотонного спада и характеризуются неравномерностью АЧХ, а также коэффициентом подавления помех в этом диапазоне.

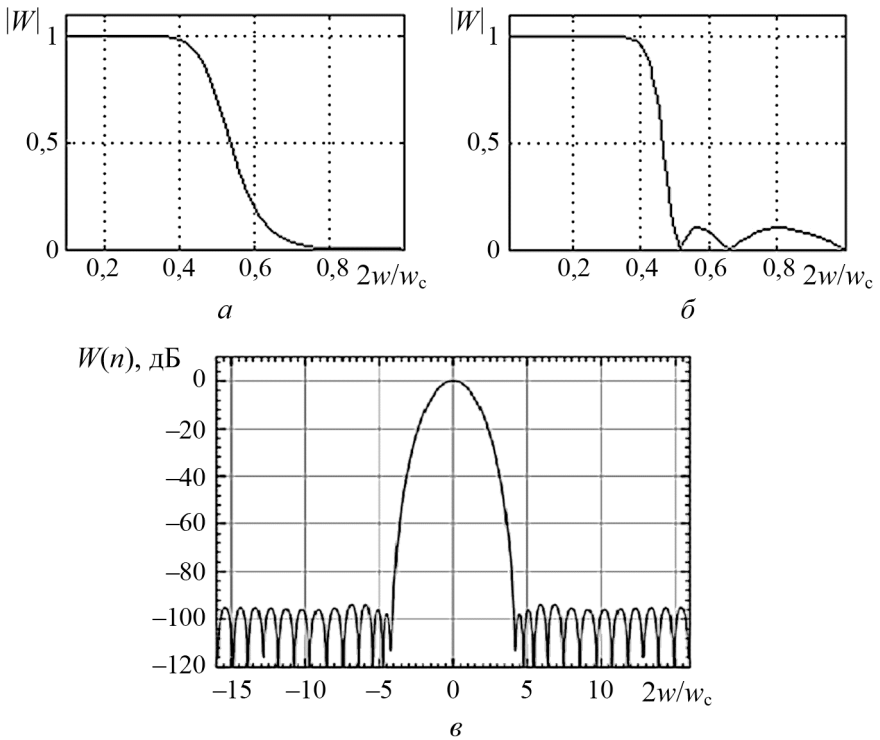


Рис. 2. Нормированные АЧХ фильтров Баттерворта (а), Чебышева II рода (б) и КИХ-фильтра Блэкмана — Наталла (в):

$|W|$ — нормированный модуль передаточной функции, т. е. $\left| \frac{W(w)}{W(0)} \right|$; $2w/w_c$ — нормированная круговая частота

Для сравнительного анализа описанных фильтров оптимизируем их параметры. В частности, для фильтров Баттерворта и Чебышева II рода необходимо определить (оптимизировать) такие параметры, как *частота среза* и *порядок фильтра*. Кроме того, для фильтра Чебышева II рода необходимо определить *коэффициент подавления* в диапазоне подавления.

Фильтры Баттерворта и Чебышева II рода обрабатывают данные по угловой скорости. Результатом их работы является значение $\Omega_{\text{вых}}[n]$ для последнего, n -го значения массива данных за весь период наблюдения. Полученное значение $\Omega_{\text{вых}}[n]$ сравнивается с точным значением измеряемой угловой скорости, равной $\Omega_{\text{изм}} = 12^\circ/\text{ч}$, и вычисляется отклонение. Затем генерируется следующий график выходного сигнала ЛГ для другой последовательности случайных чисел и снова вычисляется отклонение «приборного» значения измеряемой угловой скорости от точного значения, равного $12^\circ/\text{ч}$.

Для определения СКО «приборного» значения измеряемой угловой скорости от точного значения проводится серия вычислительных

экспериментов. При этом на вход фильтра подается 40 массивов выходных данных ЛГ по 144 001 точке (для времени измерения 6 мин и частоты следования данных 400 Гц), полученных путем численного решения уравнения (1) для различных функций угловых вибраций $\vartheta(t)$, сгенерированных на непересекающихся случайных числовых последовательностях.

На рис. 3 показан результат расчетов СКО погрешности измерения угловой скорости $12^\circ/\text{ч}$ в зависимости от частоты среза w_c .

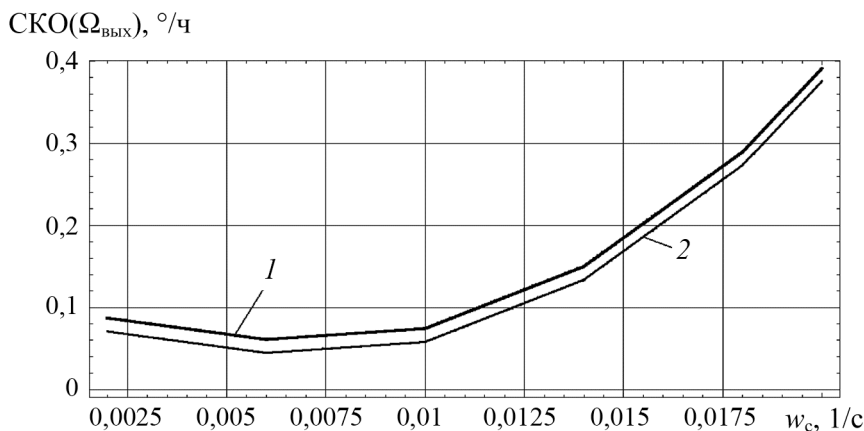


Рис. 3. Среднеквадратическое отклонение выходного сигнала ЛГ при подключении фильтра Баттерворта (1) и фильтра Чебышева II рода (2)

С уменьшением частоты среза в фильтрах Баттерворта и Чебышева II рода КП помех повышается, однако поскольку длительность переходного процесса увеличивается, растет и его негативное влияние на результат работы фильтров. При продолжительности переходного процесса свыше 6 мин (в случае если общее время измерения составляет 6 мин) использовать БИХ-фильтры в проводимом вычислительном эксперименте нецелесообразно из-за больших погрешностей. Таким образом, существует некая оптимальная частота среза.

С увеличением порядка БИХ-фильтров улучшается подавление частот за частотой среза. Порядок фильтра не столь значительно влияет на оптимальную частоту среза. Так, увеличение порядка выше 4-го приводит не к улучшению работы фильтра, а к увеличению влияния ошибок округления.

Аналогично оптимизируется и КП в диапазоне подавления фильтра Чебышева II рода.

В результате моделирования уравнения (1), в котором СКО вибраций задано равным 5% , время измерения 6 мин и измеряемая угловая скорость $12^\circ/\text{ч}$, получены следующие оптимальные значения:

- для фильтра Баттерворта $w_c = 0,00727$ Гц, порядок — 4-й;
- для фильтра Чебышева II рода $w_c = 0,00749$ Гц, порядок — 4-й.

Фильтр Блэкмана — Наталла характеризуется *порядком* N и значениями *коэффициентов фильтра*. Порядок фильтра N нецелесообразно выбирать менее 144 001 — количества выходных данных гиromетра за все время измерения, т. е. за 6 мин. Коэффициенты фильтра определяются формулой, полученной Блэкманом и Наталлом, и однозначно зависят от порядка фильтра. Таким образом, КИХ-фильтр Блэкмана — Наталла не содержит параметров, которые можно было бы подвергнуть оптимизации.

Сравнение работы фильтров Баттерворта и Чебышева II рода с другими фильтрами проводилось с использованием их оптимальных параметров.

Фильтр, построенный на базе робастной селекции прямых линий регрессии. Фильтр выполняет расчет скользящих линий регрессии первого порядка, тангенс угла наклона которых вычисляется по формуле

$$Ki = \frac{6(2Y_i + Y_1 - nY_1)}{n(n-1)(n+1)}. \quad (2)$$

Здесь $Y_i = \sum_{i=1}^n \theta_{\text{вх}}[i]i$, $Y_1 = \sum_{i=1}^n \theta_{\text{вх}}[i]$ ($\theta_{\text{вх}}[i]$ — входные данные по углу);

n — размах линии регрессии.

Выходной параметр фильтра определяется как среднее значение Ki всех прямых линий регрессии:

$$\Omega_{\text{вых}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Ki, \quad (3)$$

где M — число линий регрессии.

Метод робастной селекции заключается в следующем.

1. По значениям $\varphi(t)$ с выхода ЛГ вычисляют одновременно (параллельно) множество скользящих линий регрессии первого порядка [10] (прямые линии проведены так, чтобы сумма квадратов отклонений данных от линии была минимальной).

2. Результаты расчета наклонов линий регрессии по формуле (2) после завершения процесса начальной ориентации обрабатывают с помощью алгоритма поэтапного робастного оценивания классическим статистическим методом, отбрасывая на каждом этапе один резко выделяющийся результат вычислений до тех пор, пока не будет отброшена половина результатов вычислений (рис. 4).

3. По оставшимся наклонам вычисляют по формуле (3) среднее значение, которое и является итоговым выходным значением изме-

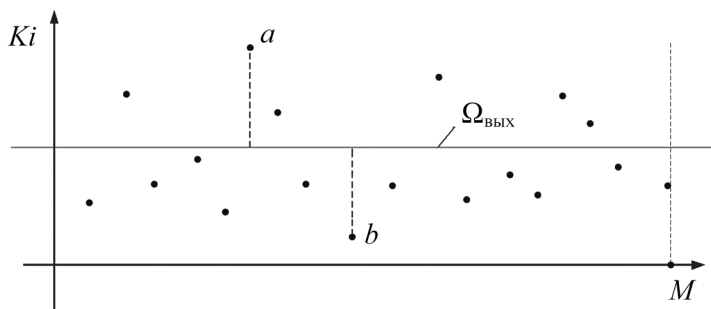


Рис. 4. Иллюстрация метода робастной селекции (a и b — максимально удаленные от средней линии точки)

ряемой угловой скорости за весь период начальной ориентации прибора.

Оптимизация размаха линий регрессии. Оптимизация размаха осуществляется следующим образом.

Выбирается минимальный размах R линий регрессии — 90 % общего количества K точек измерения за все время измерения. Скользящим образом проводятся M линий регрессии со сдвигом $(K - M)/R$ (значения R и M выбираются такими, чтобы отношение $(K - M)/R$ было целым числом). Робастно из M наклонов линий регрессии вычисляется и запоминается средний наклон линий.

Затем генератор случайных чисел перенастраивается и генерируется новая функция вибраций основания. Путем моделирования получается новый выходной сигнал гиromетра, который обрабатывается по алгоритму, описанному ранее для выбранных значений R и M . После накопления массива данных о средних наклонах вычисляется СКО в этом массиве относительно точного значения. Полученное значение СКО ставится в соответствие выбранному значению R .

Затем значение R увеличивается и вычисляется новое значение СКО. В результате получается график зависимости СКО от R , на котором видно, что при определенном R СКО имеет минимальное значение.

После проведения процедуры оптимизации исходя из получения наименьшего значения СКО размах линий регрессии составил 134 180 точек или 93,18 % общего числа (144 001) входных данных фильтра (для времени измерения 6 мин и частоты следования данных 400 Гц).

Сравнение эффективности работы перечисленных фильтров. Результаты математического моделирования работы четырех цифровых фильтров, обрабатывающих выходной сигнал ЛГ и находящихся в условиях вибраций в диапазоне частот 1...400 Гц с СКО угловой

скорости вибраций $5 \text{ }^\circ/\text{с}$ и равномерной спектральной плотностью по углу фазы, за 6 мин измерения малой постоянной угловой скорости $12 \text{ }^\circ/\text{ч}$ сведены в таблицу.

Результаты вычислительных экспериментов

Наименование фильтра	СКО шума на выходе фильтра, $^\circ/\text{ч}$
Фильтр Баттерворта четвертого порядка	0,059
Фильтр Чебышева II рода четвертого порядка	0,043
Фильтр Блэкмана — Наталла	0,018
Фильтр, построенный на базе робастной селекции прямых линий регрессии	0,007

Сравнение показывает, что эффективность фильтра, построенного на базе робастной селекции прямых линий регрессии, превосходит эффективность БИХ-фильтров Баттерворта и Чебышева II рода, а также КИХ-фильтра Блэкмана — Наталла. Однако применение фильтра, построенного на базе робастной селекции, влечет за собой дополнительные затраты ресурсов микропроцессора [4], производительность которых тем не менее позволяет использовать этот фильтр в реальных условиях эксплуатации.

Дальнейшие исследования, посвященные увеличению КП шумовой составляющей в выходном сигнале гиromетра, целесообразно вести, например, в направлении последовательного подключения заградительных КИХ-фильтров, настроенных на максимальный подъем уровня шумов в определенном диапазоне частот.

На основании анализа результатов моделирования системы, состоящей из ЛГ, на который воздействуют угловые вибрации, и различных цифровых фильтров на выходе, можно сделать следующие выводы:

- коэффициент подавления фильтра Блэкмана — Наталла порядка 144 001 достигает 120 дБ в частотном диапазоне 1...400 Гц. Однако КИХ-фильтр Блэкмана — Наталла менее эффективен, чем фильтр, спроектированный на базе робастной селекции прямых линий регрессии, коэффициент подавления которого составляет 132 дБ в том же диапазоне частот;

- фильтр, построенный на базе робастной селекции, обеспечивает измерение постоянной угловой скорости лазерным гиromетром с СКО, равным $0,007 \text{ }^\circ/\text{ч}$ при измерении $12 \text{ }^\circ/\text{ч}$ за 6 мин, в то время как КИХ-фильтр Блэкмана — Наталла обеспечивает измерение аналогичной величины с СКО, равным $0,018 \text{ }^\circ/\text{ч}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chen A., Li J., Chu Z. Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter. *Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012. 8th IEEE International Symposium on IEEE, China, 2012*, pp. 178–182.
- [2] Zhang Q.-H., Hu Sh.M., Zu G.F. Research on new signal processing method of mechanically dithered ring laser gyro. *Optical Technique*, 2010, vol. 36(1), pp. 126–129 (in Chinese).
- [3] Молчанов А.В. *Исследование конструктивно-технологических характеристик лазерного гироскопа с целью повышения его качества*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2005, с. 17.
- [4] Санеев И.В. Цифровая обработка выходного сигнала лазерного гироскопа с виброподставкой. *Молодежный научно-технический вестник*, 2012, № 10.
- [5] Nuttall A.H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, vol. 29(1), pp. 84–91.
- [6] Кестер У. *Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов*. Москва, Техносфера, 2010, с. 124–157.
- [7] Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И. *Лазерный гироскоп*. Москва, Советское радио, 1975, с. 109, 110.
- [8] Lee J., Whaley P.W. Prediction of the angular vibration of aircraft structures. *J. of Sound and Vibration*, 1976, vol. 49(4), pp. 541–549.
- [9] Санеев И.В. Симметричная неявная схема решения уравнения лазерного гироскопа. *Сб. тез. докл. общеуниверситетской науч.-техн. конф. «Студенческая весна-2010»*, 1–30 апреля 2010 г. Москва, 2010, т. X, ч. 1, с. 197–199.
- [10] Фёрстер Э., Рёнц Б. *Методы корреляционного и регрессионного анализа [Methoden der Korrelation und Regressiolynsanalyse]*. Москва, Финансы и статистика, 1981, с. 48–88.

Статья поступила в редакцию 24.11.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Санеев И.В. К вопросу о выборе цифрового фильтра на выходе лазерного гиromетра в режиме измерения малых постоянных угловых скоростей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 01. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1358.html>

Санеев Илья Владимирович родился в 1989 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Аспирант кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: saneevil@mail.ru

On the selection of the digital filter at the laser gyrometer output in the mode of measuring small constant angular velocity

© I.V. Saneev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper describes investigations of a possibility to increase the accuracy of laser gyrometer operating in the mode of measuring small constant angular velocity. The accuracy is increased by noise suppression at the output using various digital filters in the case when the noise amplitude is by several orders higher than measured signal. Noise at the output of laser gyro can be caused by the internal factors: e.g. dither noise, discrete output of pulse-phase detector (PPD), etc., and external reasons, such as vibrating disturbance. Modeling such digital filters as Butterworth-IIR-Filter, Chebyshev II order IIR filter, Blackman-Nuttall-FIR-Filter and the filter based on robust selections of straight regression lines under conditions of vibrations has been performed. As a result of research it has been established, that at reasonable microprocessor resource intensity the filter based on robust selections of straight regression lines most effectively suppresses output noise which allows to measure low constant angular velocity with an acceptable accuracy for a variety of applications with intense vibrations of a base caused, e.g., by engine operation.

Keywords: laser gyroscope, laser gyrometer, digital signal processing, digital filters, filter based on robust estimation.

REFERENCES

- [1] Chen A., Li J., Chu Z. Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter. Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012. 8th IEEE International Symposium on IEEE, China, 2012, pp. 178–182.
- [2] Zhang Q.H., Hu Sh.M., Lu G.F. Research on new signal processing method of mechanically dithered ring laser gyro. *Optical Tehnique*, 2010, vol. 36(1), pp. 126–129. [in Chinese].
- [3] Molchanov A.V. *Issledovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh kharakteristik lazernogo giroskopa s tselyu povysheniya ego kachestva* [Investigation of structural and technological characteristics of the laser gyroscope for the purpose of improving the quality]. Ph.D. Thesis, Moscow, 2005, p. 17.
- [4] Saneev I.V. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik –Youth Science and Technology Gazette*, 2012, no. 10.
- [5] Nuttall A.H. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, vol. 29(1), pp. 84–91.
- [6] Kester U. *Proektirovanie sistem tsyfrovoy i smeshannoy obrabotki signalov* [Design of digital and mixed signal processing systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010, pp. 124–157.
- [7] Bychkov S.I., Lukyanov D.P., Bakalyar A.I. *Lazernyy giroskop* [Laser gyroscope]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975, pp. 109, 110.
- [8] Lee J., Whaley P.W. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, vol. 49(4), pp. 541–549.
- [9] Saneev I.V. Simmetrichnaya neyavnaya skhema resheniya uravneniya lazernogo giroskopa [Symmetric implicit scheme for solving the equation of the laser gy-

ro]. *Abstracts of scientific and technical conference "Student Spring 2010"*, April 1–30, 2010. Moscow, 2010, vol. X, part 1, pp. 197–199.

- [10] Ferster E., Rents B. *Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza* [Methoden der Korrelation und Regressionsanalyse]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1981, p. 48–88. [in Russian].

Saneev I.V. (b. 1989) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2012. Ph.D. student of the Electrical Engineering and Industrial Electronics Department at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: saneevil@mail.ru