



УДК 621.3.014.33

Помехоустойчивая обработка сигналов в баллистическом лазерном гравиметре с симметричным способом измерения ускорения свободного падения

А.В. Омельченко¹, В.Ф. Болюх², А.И. Винниченко³, В.С. Купко³¹ Харьковський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна
otela5656@gmail.com² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", ул. Кирпичева, 2, 61002, Харків, Україна³ Національний научний центр "Інститут метрології", ул. Митрофанівська, 42, 61002, Харків, Україна
vinncs2@gmail.com

Аннотация

Рассмотрены методы помехоустойчивой обработки сигналов в баллистическом лазерном гравиметре (БЛГ) с симметричным способом измерения ускорения свободного падения (УСП).

Основным источником ошибок при измерениях УСП с помощью БЛГ являются сейсмические колебания земной поверхности. В гравиметрах с симметричным способом измерения сравнительно короткий толчок катапульты порождает колебания фундамента, которые называются автосейсмическими и вызывают систематическую погрешность измерения УСП.

Традиционно используемый в баллистических гравиметрах метод наименьших квадратов (МНК) является оптимальным в условиях воздействия некоррелированных аддитивных помех при соблюдении гомоскедастичности. Указанные условия не соблюдаются в баллистической гравиметрии. Поэтому актуальна задача развития новых методов обработки сигналов в БЛГ.

Основное внимание уделено синтезу весовых функций гравиметров, минимизирующих влияние следующих видов аддитивных помех: 1) внешней сейсмической помехи; 2) автосейсмической помехи; 3) помехи дискретизации. Для комплексного учета различных помех в работе использована совокупность показателей помехоустойчивости.

Для нахождения весов наблюдений использован взвешенный метод наименьших квадратов (ВМНК), который предполагает использование весовых окон, в частности окон Хана. В отличие от известных методов регрессионного анализа, форма таких окон определяется не изменением дисперсии помехи, а выбирается таким образом, чтобы максимально ослабить влияние помехи на результат измерения УСП.

Приведены свойства весовых функций гравиметров. Выполнен анализ влияния формы весовых окон Хана на показатели помехоустойчивости БЛГ. Показано, что увеличение скорости спадания весового окна от центра к краям приводит к существенному уменьшению автосейсмической составляющей погрешности измерения УСП при незначительном увеличении остальных показателей помехоустойчивости.

Исследовано влияние пропусков наблюдений в окрестности вершины траектории движения пробного тела на результаты измерения УСП. Показано, что выполнение условия Найквиста для весовой функции гравиметра приводит к уменьшению смещения автосейсмической составляющей погрешности измерения УСП.

Ключевые слова: автосейсмический эффект, баллистический лазерный гравиметр, весовая функция, аддитивные помехи, симметричный способ измерения.

Получено: 15.01.2019

Отредактировано: 12.02.2019

Одобрено к печати: 25.02.2019

Постановка проблемы

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения (УСП) применяются баллистические лазерные гравиметры (БЛГ) [1–3], которые реализуют симметричный

или несимметричный методы измерения УСП. Гравиметры с симметричной схемой измерения имеют ряд достоинств. Поскольку сила сопротивления газовой среды воздействует на результат измерения с противоположными знаками при взлете и падении пробного тела (ПТ), то происходит их

© ННЦ «Інститут метрології», 2019

взаимная компенсация. Кроме того, они имеют меньшие габариты и более мобильны.

Составляющие погрешности измерения ускорения свободного падения с помощью БЛГ рассмотрены в ряде работ [3–7]. Основным источником ошибок при измерениях УСП с помощью баллистических гравиметров являются микросейсмические колебания земной поверхности. В симметричных гравиметрах сравнительно короткий толчок катапульты порождает колебания фундамента, которые называются автосейсмическими. Это вызывает значительную систематическую погрешность измерения УСП. Кроме того, следует учитывать и влияние помех дискретизации, возникающих в измерителе параметров движения (ИПД) ПТ.

Традиционно используемый в баллистических гравиметрах метод МНК является оптимальным в условиях воздействия некоррелированных помех при соблюдении гомоскедастичности. Указанные условия не соблюдаются в баллистической гравиметрии, поскольку вибрации референтного отражателя интерферометра БЛГ, воспринимаемые при обработке сигнала как аддитивная помеха, имеют сложный спектральный состав и их дисперсия изменяется на интервале обработки. Поэтому актуальна задача развития новых методов обработки сигналов в БГ.

Целью работы является разработка оптимальных методов обработки сигналов БЛГ при воздействии основных видов помех: 1) внешних сейсмических помех; 2) автосейсмической помехи; 3) помех дискретизации.

Описание помех

Основным видом помех, ограничивающим точность гравиметрических измерений, являются внешние сейсмические помехи, обусловленные колебаниями грунта.

Микросейсмические колебания представляют собой микроколебания грунта в широком диапазоне частот. Установлено, что эти микроколебания близки к стационарному случайному процессу с явно выраженными преобладающими частотами.

Аналитическая модель спектральной плотности внешних сейсмических помех может быть представлена в виде [2]

$$\sqrt{G_{\xi^r}(f)} = \begin{cases} 2,36 \cdot 10^{-5}, & f \leq 0,01; \\ 59,19 \cdot 10^5 f^{5,7}, & 0,01 < f \leq 0,171; \\ 1,5 \cdot \frac{1}{f^{2,9}}, & 0,171 < f \leq 0,636; \\ 11,05 \cdot f^{1,51}, & 0,636 < f \leq 4,59; \\ 110, & f > 4,59, \end{cases} \quad (1)$$

где $G_{\xi^r}(f)$ — односторонняя спектральная плотность мощности сейсмических ускорений (в единицах [мкГал²/Гц]), равная нулю для отрицательных частот и удвоенной двухсторонней спектральной плотности $g_{\xi^r}(f)$ для неотрицательных частот, причем частота f выражается в Герцах.

На рис. 1 представлена спектральная плотность микросейсмических ускорений в диапазоне частот от 0,001 до 100 Гц, рассчитанная согласно (1). Характерной особенностью спектра является наличие пика

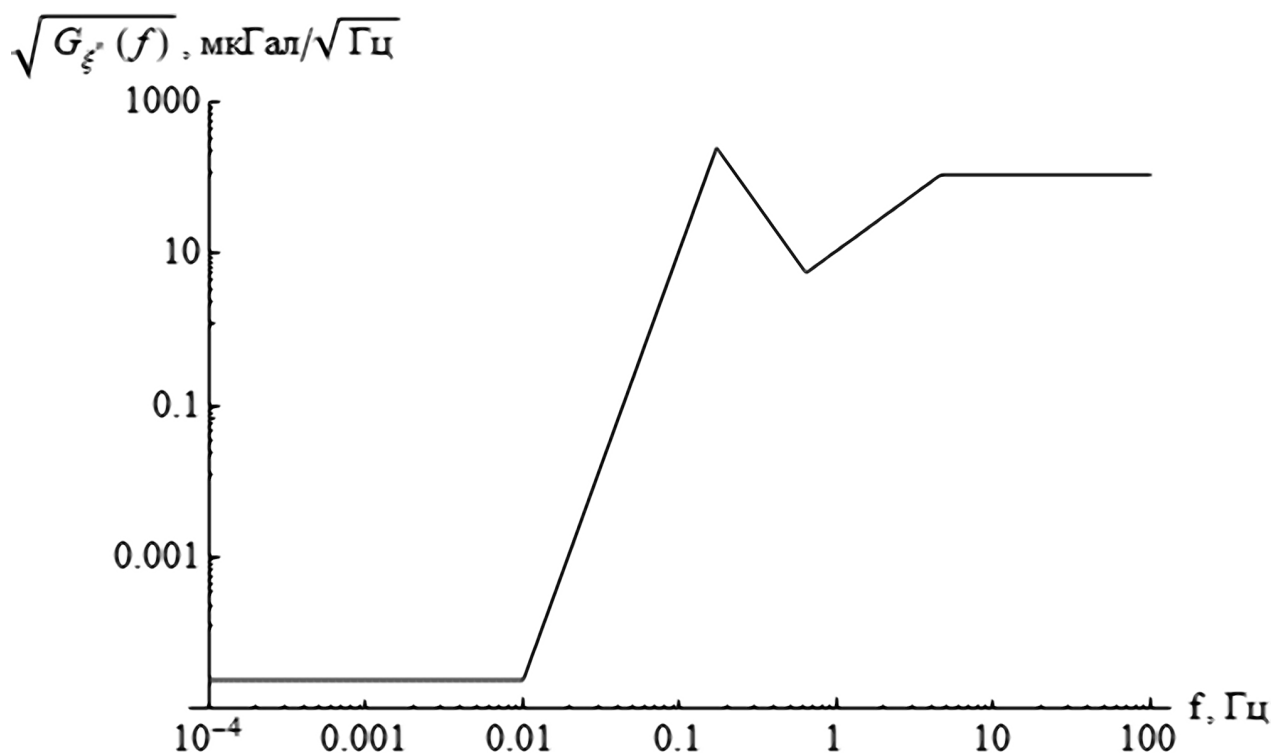


Рис. 1. Спектральная плотность мощности микросейсмических ускорений

в районе 0,14–0,17 Гц, а также постоянство спектральной плотности в диапазоне частот выше 5 Гц.

При измерении УСП сейсмические ускорения могут в первом приближении рассматриваться как “белый шум” (стационарный случайный процесс с постоянной спектральной плотностью $G_0 \in (10^2, 10^4)$ мкГал²/Гц).

Вторым важным видом помех для баллистической гравиметрии является автосейсмическая помеха, приводящая к соответствующей составляющей ошибки измерения УСП. Ее величина в значительной мере определяется механической системой БЛГ, включающей фундамент, на котором устанавливается баллистический блок и штатив интерферометра, а также устройство виброзащиты. В работах [6, 7] подробно рассмотрено влияние эффекта автосейсмике на показания БЛГ. При заданной механической системе БЛГ импульс силы, воздействующий на фундамент при разгоне пробного тела, приводит к помехе по пути, имеющей вид затухающих колебаний. В настоящей работе используется модель механической системы БЛГ с жесткой установкой баллистического блока и интерферометра на фундаменте, описанной в работах [6, 7].

Третьим по значимости видом помех являются ошибки дискретизации. Существует два основных метода дискретизации сигнала в баллистическом гравиметре с использованием [5]: 1) схемы совпадений; 2) АЦП. Независимо от выбранного способа ошибки дискретизации пути можно считать статистически независимыми величинами с одинаковой дисперсией.

Все три вида помех носят аддитивный характер и в силу линейности БЛГ как измерительной системы [3] могут анализироваться независимо друг от друга.

Математическая постановка задачи обработки

Будем полагать, что в вакуумной камере БЛГ производится подбрасывание ПТ с некоторой начальной скоростью. На выходе ИПД наблюдаются пары данных пути и времени

$$\{x(t_k), t_k\}, k = \overline{0, K-1}, \quad (2)$$

где отсчеты времени $t_k \in (0, T)$, а отсчеты пути

$$x(t_k) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot (t_k - \tau)^i + \zeta(t_k). \quad (3)$$

В (3) использованы обозначения: T — длительность интервала наблюдения; τ — момент времени, в который скорость тела равна нулю; $a_i, i = \overline{1, n}$ — неизвестные коэффициенты полиномиальной аппроксимации траектории движения ПТ; n — порядок степенного полинома в (3); $\zeta(t)$ — аддитивная помеха. В большинстве случаев $n=2$.

Удвоенное значение коэффициента при второй степени полинома в модели (3) является величиной УСП: $g=2a_2$, которую требуется найти в результате измерений.

Результат измерения УСП по одному броску ПТ находится в виде

$$\hat{g} = \sum_{k=0}^{K-1} w(k) \cdot x(t_k). \quad (4)$$

Требуется найти такие значения весов обработки $w(k)$ в выражении (4), чтобы обеспечить минимум СКО оценки \hat{g} от истинного значения УСП g .

Весовые функции БГ

Впервые весовые функции баллистических гравиметров были введены в работе Занимонского Е.М. и Нагорного В.Д. [3]. Они позволяют представить результат измерения УСП в виде

$$\hat{g} = \int_0^T z^{(2)}(t)G(t)dt,$$

где $G(t)$ — весовая функция; $z^{(2)}(t)$ — вторая производная сигнала пути на выходе интерферометра.

Функция $G(t)$ удовлетворяет:

- условию нормирования

$$\int_0^T G(t)dt = 1; \quad (5)$$

- допускает сплайновое представление вида [5]

$$G(t) = \sum_{k=0}^{K-1} w(k) \cdot (t - t_k)_+, \quad (6)$$

где $w(k)$ — весовые коэффициенты при отсчетах пути в алгоритме измерения УСП;

функция $(t - t_k)_+ = \begin{cases} t - t_k, & t > t_k; \\ 0, & t \leq t_k. \end{cases}$

Из (6) несложно показать, что коэффициенты обработки определяются через отсчеты весовой функции следующим образом:

$$w_i = \begin{cases} \frac{G(t_1)}{t_1 - t_0}, & i = 0; \\ \frac{G(t_{i+1}) - G(t_i)}{t_{i+1} - t_i} - \frac{G(t_i) - G(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}, & 1 \leq i \leq K-2; \\ \frac{G(t_{K-2})}{t_{K-1} - t_{K-2}}, & i = K-1, \end{cases} \quad (7)$$

или же в случае, когда временные отсчеты в (2) равномерно дискретизированы по времени, то

$$w_i = \Delta^{-1} \cdot [G((i+1)\Delta) - 2G(i\Delta) + G((i-1)\Delta)],$$

$$0 \leq i \leq K-1. \tag{8}$$

Из (8) видно, что с точностью до сомножителя Δ^{-1} отсчеты коэффициентов обработки выражаются через конечные разности второго порядка отсчетов весовой функции.

Преобразование Фурье весовой функции гравиметра называется частотной характеристикой гравиметра [8]

$$H(f) = \int_0^T G(t)e^{-j2\pi ft} dt. \tag{9}$$

Модуль функции (9) представляет собой АЧХ баллистического гравиметра $|H(f)|$, которая характеризует влияние гармонических помех различных частот на показания БЛГ.

Величина

$$\theta = \int_0^T G^2(t) dt \tag{10}$$

может трактоваться как эффективная полоса пропускания БЛГ. Отметим, что значение θ характеризует влияние широкополосной помехи по ускорению на результат измерения УСП. В этом случае дисперсия погрешности измерения УСП

$$M[\Delta_g^2] = \sigma_g^2 \theta,$$

где σ_g^2 — дисперсия помехи по ускорению.

Установлено [5], что при использовании метода МНК и достаточно большом числе отсчетов путь-время $\theta \approx 1,43/T$, где T — время измерения УСП.

Из условий (5) и (10) можно показать, что $\theta \geq \theta_{\min}$, где величина $\theta_{\min} = 1/T$ достигается для весовой функции прямоугольного вида $G(t) = 1/T$. Однако реализация весовой функции прямоугольного вида является неприемлемой с точки зрения помехи по пути, обусловленной погрешностями дискретизации. Поэтому на практике следует обеспечить компромисс между сейсмическими помехами по ускорению и помехами дискретизации. В связи с этим, кроме показателя (10), эффективность весовой функции будем характеризовать показателем

$$\chi = 10^{-1} \sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} w^2[k]}, \tag{11}$$

значение которого может быть трактовано как среднеквадратическая погрешность измерения УСП гравиметром, выраженная в микрогаллах, при действии на входе гравиметра некоррелированной по перемещению помехи величиной 1 нанометр.

Синтез весовых коэффициентов обработки

В работе [9] обоснован метод формирования с помощью схемы ИПВ последовательности равноотстоящих во времени отсчетов сигнала за

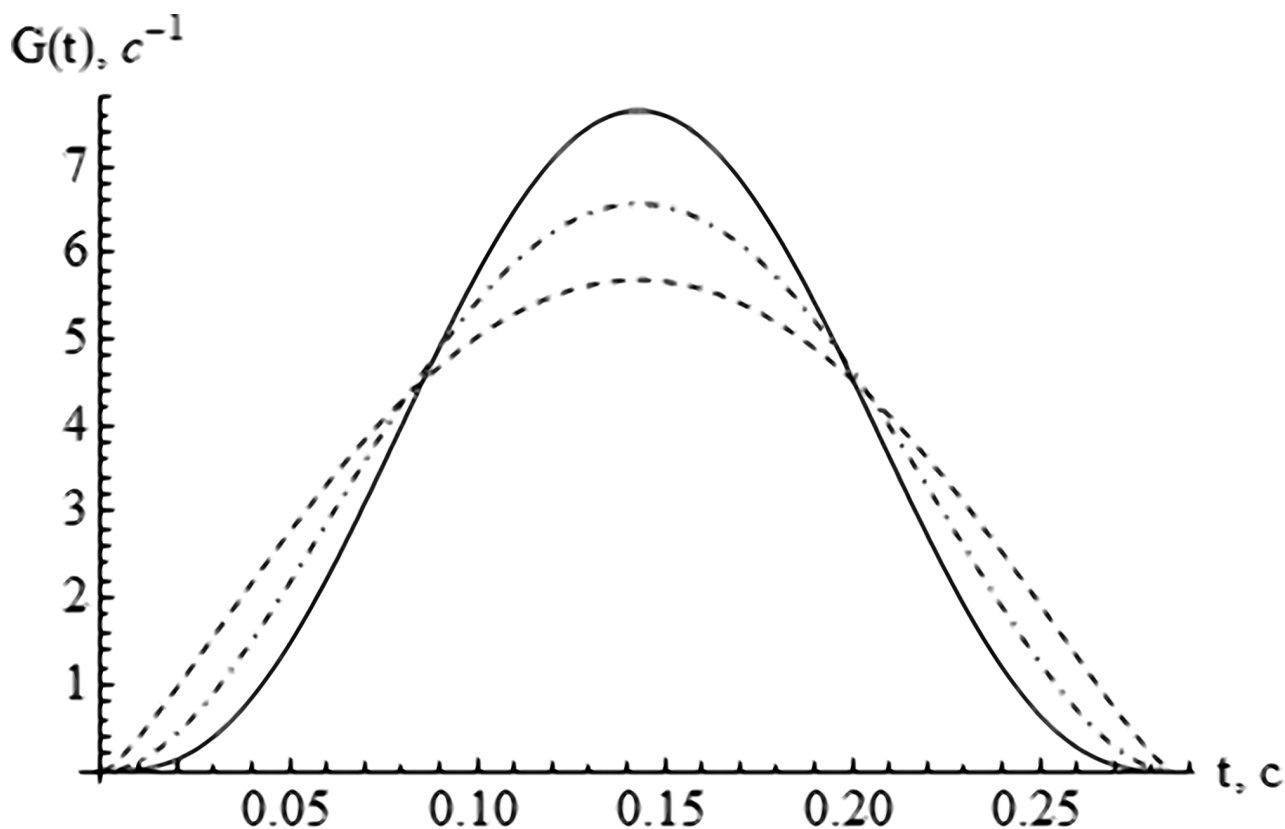


Рис. 2. Весовые функции БЛГ

счет использования локальной квадратичной интерполяции. Применение такой интерполяции создает условия для формирования необходимых весовых функций гравиметров с учетом свойств сейсмических помех внешнего и внутреннего происхождения. Поэтому в дальнейшем будем, без ограничения общности, предполагать, что пары отсчетов пути и времени с выхода ИПД равномерно дискретизированы по времени, т. е. $t_k = k\Delta$, где Δ — интервал дискретизации.

Для нахождения весов наблюдений кроме МНК можно использовать ВМНК (взвешенный метод наименьших квадратов), который предполагает использование весовых окон, в частности окон Хана вида [5]

$$\rho(k) = \frac{\Gamma(k + \alpha + 1) \Gamma(K - k + \alpha)}{\Gamma(k + 1) \cdot \Gamma(K - k)}, \quad k = \overline{0, K - 1}, \quad (12)$$

где действительное число $\alpha > -1$ задает форму окна.

Применение различных весовых окон $\rho(k)$ приводит к соответствующим весовым коэффициентам обработки $w(k)$, $k = \overline{0, K - 1}$ и весовым функциям БЛГ $G(t)$, значения которых могут быть рассчитаны согласно выражению (6), которое для равноотстоящих по времени данных с ИПД имеет вид

$$G(t_k) = \Delta \sum_{s=0}^{K-1} w(s) \cdot (k - s).$$

На рис. 2 изображены весовые функции БЛГ, рассчитанные с использованием окон Хана. На

нем штрих-пунктирной кривой показана весовая функция БЛГ, построенная с применением МНК ($\alpha=0$); пунктирной кривой — ВМНК с $\alpha=-0,7$; сплошной кривой — ВМНК с $\alpha=1$.

В табл. 1 показано, как изменяются показатели θ и χ в зависимости от значения параметра формы окна α (при числе отсчетов на интервале наблюдения $K=571$).

Таблица 1

Зависимости θ и χ от α

α	-0,9	-0,5	0	0,5	1	2	3
$\theta \cdot T$	1,23	1,32	1,43	1,53	1,63	1,81	1,97
χ	6,90	1,96	1,38	1,50	1,71	2,22	2,78

Отметим, что определение УСП методом ВМНК с использованием весового окна Хана с параметром $\alpha=0$ равноценно определению УСП методом МНК. С учетом этого из анализа характеристик помехоустойчивости, приведенных в табл. 1, следует, что уменьшение значения параметра α приводит к выигрышу по эффективной полосе пропускания БЛГ θ . В частности, при $\alpha=-0,9$ значение $\theta=1,23/T$, тогда как при $\alpha=0$ (обработка МНК) — $\theta=1,43/T$.

При построении окон с пропущенными центральными наблюдениями удобно пользоваться дискретной сеткой по оси времени $k = -m, m$. В методе ВМНК используем окно вида

$G(t), c^{-1}$

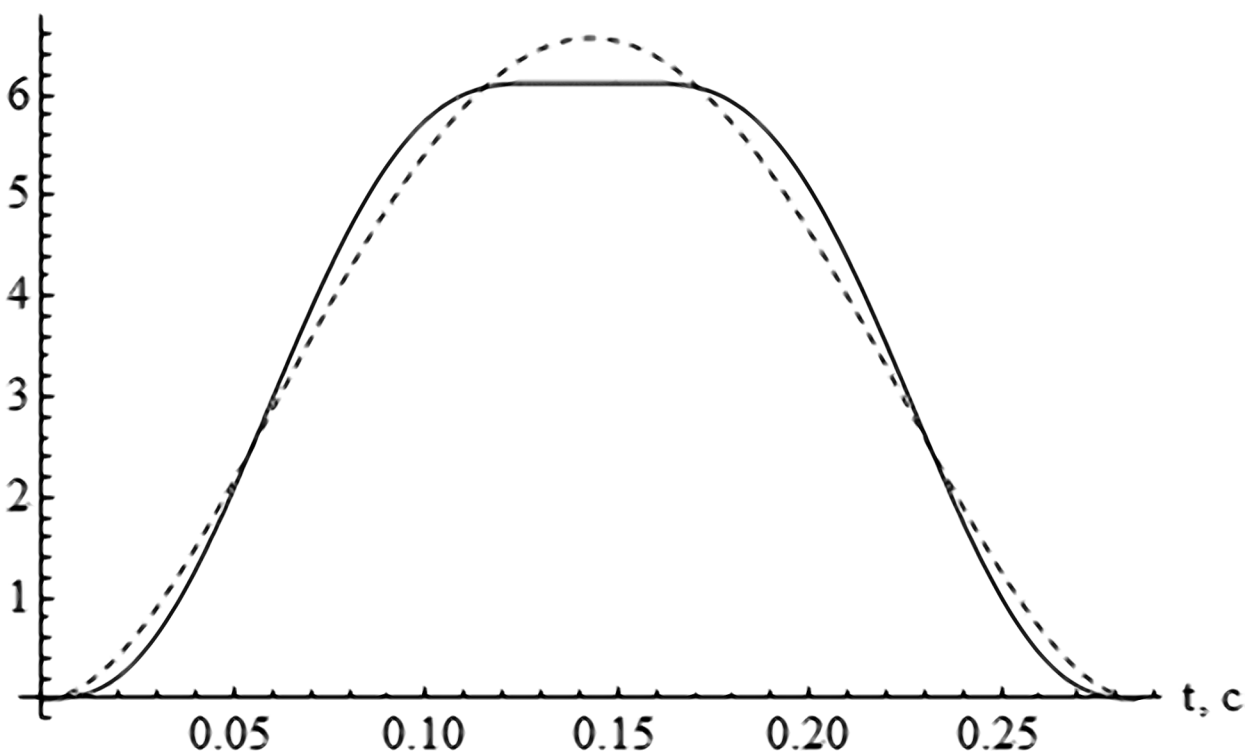


Рис. 3. Весовая функция БЛГ при использовании ВМНК с плоской вершиной

$$\rho(k) = \begin{cases} \frac{\Gamma(|k| - h + \alpha)\Gamma(m + 1 - |k| + \alpha)}{\Gamma(|k| - h)\Gamma(m + 1 - |k|)}, & \text{при } h + 1 \leq |k| \leq m; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (13)$$

построенное на основе окна Хана (12) с параметром $\alpha > -1$.

На рис. 3 сплошной кривой изображена весовая функция БЛГ, построенная согласно ВМНК при использовании окна (13) с параметрами $m=285, h=29, \alpha=\beta=1$. Здесь же пунктирной кривой изображена весовая функция МНК с параметром $m=285$.

Очевидно, что при воздействии на вход БЛГ автосейсмической помехи в виде гармонического колебания с амплитудой g_0 , частотой f и начальной фазой φ автосейсмическая составляющая погрешности (АСП) измерений представима в виде

$$\Delta g(T) = g_0 \operatorname{Re} \left\{ e^{j\varphi} \int_0^T G(t) e^{j2\pi f t} dt \right\} \quad (14)$$

или же после замены переменной $s=t/T$

$$\Delta g(T) = g_0 \operatorname{Re} \left\{ e^{j\varphi} \int_0^1 G_0(s) e^{j2\pi f T s} ds \right\}, \quad (15)$$

где $G_0(s)$ — нормированная весовая функция, связанная с весовой функцией БЛГ соотношением

$$G(t) = \frac{1}{T} G_0\left(\frac{t}{T}\right). \quad (16)$$

Модуль интеграла в (14) и (15) совпадает с модулем ЧХ БЛГ (9). Поэтому, если будем рассматривать зависимость АСП измерений $\Delta g(T)$ как функцию интервала измерения T , обеспечив неизменность формы весовой функции от величины T согласно (16), то получим, что вид функции $\Delta g(T)$ определяется видом АЧХ БЛГ. Отметим, что произведение $f T$ в выражении (15) играет роль нормированной частоты.

При выборе весовых функций БЛГ полезным оказывается следующее утверждение.

Утверждение. Если нормированная весовая функция баллистического гравиметра $G_0(s)$ удовлетворяет условию

$$G_0(s - b) + G_0(s) + G_0(s + b) = G_0(0), \quad s \in [0, 1], \quad (17)$$

где $1/2 \leq b \leq 1$, и автосейсмическая помеха имеет гармонический вид, то АСП гравиметра

$$\Delta g\left(\frac{k}{f \cdot b}\right) = 0, \quad k = 1, 2, \dots \quad (18)$$

Доказательство утверждения производится аналогично теореме Найквиста [10].

Доказательство. В точках $T = \frac{k}{f \cdot b}$ имеем

$$\Delta g\left(\frac{k}{f \cdot b}\right) = g_0 \cdot \operatorname{Re} \left[e^{j\varphi} \int_0^1 G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds \right]. \quad (19)$$

Разобьем интеграл в выражении (19)

$$\int_0^1 G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds = \int_0^{(1-b)/2} G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds + \int_{(1-b)/2}^{(1+b)/2} G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds + \int_{(1+b)/2}^1 G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds.$$

С учетом того, что функция $G(s)$ равна нулю вне отрезка $[0, 1]$, получим

$$\int_0^1 G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds = \int_{(1-3b)/2}^{(1-b)/2} G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds + \int_{(1-b)/2}^{(1+b)/2} G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds + \int_{(1+b)/2}^{(1+3b)/2} G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds. \quad (20)$$

После замены переменных и изменения порядка интегрирования и суммирования в (20) приходим к соотношению

$$\int_0^1 G_0(s) e^{j2\pi \frac{k}{b} s} ds = \int_{(1-b)/2}^{(1+b)/2} \{G_0(s - b) + G_0(s) + G_0(s + b)\} e^{j2\pi \frac{k}{b} s} du. \quad (21)$$

Из (21) с учетом условия (17) следует справедливость утверждения.

Условие (18) является важным в том смысле, что его выполнение в случае гармонической помехи с частотой f обеспечивает колебательный характер ошибки $\Delta g(T)$ с изменением измерительного интервала T . Выполнение (18) позволяет уменьшить интервал неопределенности измерения УСП, центр которого находится в области нулевого значения.

Параметр b , входящий в (18), связан с протяженностью плоской вершины τ_B весовой функции соотношением

$$b = \frac{1}{2} + \frac{\tau_B}{2T}.$$

Таким образом, при $\tau_B=0$ параметр $b=1/2$, а при $\tau_B=T$ параметр $b=1$.

Несложно показать, что из любой симметричной нормированной весовой функции $G_0(s)$ с плоской вершиной длительностью τ_B можно получить другую симметричную нормированную весовую функцию $G_0(s)$, удовлетворяющую условию (17), за счет преобразования

$$G'_0(s) = \begin{cases} \frac{1}{2}[G_0(0) + G_0(|s|) - G_0(|s| - b)], & |s| < \frac{1}{2}; \\ 0, & |s| \geq \frac{1}{2}, \end{cases} \quad (22)$$

где параметр $b = \frac{1}{2} + \frac{\tau_B}{2}$.

Результаты исследования помехоустойчивости методов обработки

Исследование помехоустойчивости методов обработки проводилось с использованием следующих тестовых помех: 1) широкополосной помехи со спектральной плотностью по ускорению вида (1); 2) автосейсмической помехи с характеристиками, описанными в работах [6, 7], и имеющей вид затухающей гармоники с частотой $f_0 \approx 32,6$ Гц; 3) некоррелированной помехи по пути.

В табл. 2 приведены характеристики помехоустойчивости БЛГ с весовой функцией с плоской вершиной (протяженность вершины $\tau_B = 0,1 \cdot T$), полученные с применением математического моделирования. Здесь кроме описанных ранее показателей θ и χ , которые определяются согласно (10) и (11), использовались: показатель σ_g , характеризующий реакцию БЛГ на внешнюю сейсмическую помеху со спектральной плотностью вида (1); Δg — АСП измерений УСП. Весовые коэффициенты обработки рассчитывались с использованием ВМНК для окна (13) с параметрами $m=285$, $h=29$, $\alpha=1$, $T=0,286$ с.

Из анализа характеристик помехоустойчивости, приведенных в табл. 2, следует, что увеличение параметра формы весового окна α , т. е. увеличение скорости его спада, приводит к существенному уменьшению величины АСП при незначительном

увеличении остальных показателей помехоустойчивости.

Путем моделирования было также установлено, что коррекция гравиметра весовой функции с использованием преобразования (22) приводит к уменьшению АСП Δg на несколько микрогал (около 10 %) при незначительном ухудшении остальных характеристик помехоустойчивости (1–2 %). Ввиду важности исключения систематической погрешности измерений коррекцию весовых функций гравиметра следует признать эффективной.

Таблица 2

Характеристики помехоустойчивости БЛГ

α	θ , Гц	σ_g , мкГал	Δg , мкГал	χ , мкГал/нм
–0,5	1,350/T	76,3	95	2,03
0	1,389/T	78,4	50	1,49
0,5	1,422/T	80,3	27	1,59
1	1,449/T	81,9	16	1,77
1,5	1,472/T	83,4	19	1,96
2	1,490/T	84,6	13	2,15

Заключение

В работе исследовано влияние на погрешность измерения УСП помех следующих видов: 1) внешней сейсмической помехи; 2) автосейсмической помехи; 3) помехи дискретизации. Эти помехи имеют различные спектральные плотности мощности и требуют различной обработки при измерении УСП.

Применение ВМНК с правильно выбранными параметрами весового окна позволяет гибко адаптировать характеристики БЛГ к условиям измерения УСП.

Завадостійка обробка сигналів у балістичному лазерному гравіметрі із симетричним способом вимірювання прискорення вільного падіння

А.В. Омельченко¹, В.Ф. Болюх², О.І. Вінніченко³, В.С. Купко³

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна
omela5656@gmail.com

² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна

³ Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна
vinncs2@gmail.com

Анотація

Розглянуто методи завадостійкої обробки сигналів у балістичному лазерному гравіметрі (БЛГ) із симетричним способом вимірювання прискорення вільного падіння (ПВП).

Основним джерелом помилок при вимірюваннях ПВП за допомогою БЛГ є сейсмічні коливання земної поверхні. У гравіметрах із симетричним способом вимірювання порівняно короткий поштовх катапульти породжує коливання фундаменту, які називаються автосейсмічними і викликають систематичну похибку вимірювання ПВП. Слід враховувати і вплив завад дискретизації, що виникають при вимірюванні параметрів руху пробного тіла.

Метод найменших квадратів (МНК), що традиційно використовується у балістичних гравіметрах, є оптимальним в умовах дії некорельованих адитивних завад при дотриманні гомоскедастичності. Зазначені умови не виконуються у балістичній гравіметрії. Тому актуальним є завдання розвитку нових методів обробки сигналів у БЛГ.

Основну увагу приділено синтезу вагових функцій гравіметрів, що мінімізують вплив наступних видів адитивних завад: 1) зовнішньої сейсмічної завади; 2) автосейсмічної завади; 3) завади дискретизації. Для комплексного врахування різних завад у роботі використано сукупність показників завадостійкості.

Для знаходження ваг спостережень використано зважений метод найменших квадратів (ЗМНК), який передбачає використання вагових вікон, зокрема вікон Хана. На відміну від відомих методів регресійного аналізу, форма таких вікон визначається не зміною дисперсії завади, а вибирається таким чином, щоб максимально послабити вплив завади на результат вимірювання ПВП.

Наведено властивості вагових функцій гравіметрів. Виконано аналіз впливу форми вагових вікон Хана на показники завадостійкості БЛГ. Показано, що збільшення швидкості спадання вагового вікна від центру до країв приводить до суттєвого зменшення автосейсмічної складової похибки вимірювання ПВП при незначному збільшенні інших показників завадостійкості.

Досліджено вплив пропусків спостережень біля вершини траєкторії руху пробного тіла на результати вимірювання ПВП. Показано, що виконання умови Найквіста для вагової функції гравіметра приводить до зменшення зсуву автосейсмічної складової похибки вимірювання ПВП.

Ключові слова: автосейсмічний ефект, балістичний лазерний гравіметр, вагова функція, адитивні завади, симетричний спосіб вимірювання.

Noise-resistant signal processing in a ballistic laser gravimeter with a symmetrical way of measuring the gravitational acceleration

A. Omelchenko¹, V. Bolyukh², A. Vinnichenko³, V. Kupko³

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine
omela5656@gmail.com

² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine

³ National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
vinnsc2@gmail.com

Abstract

The paper considers methods for noise-resistant processing of signals in a ballistic laser gravimeter (BLG) with a symmetrical way of measuring the gravitational acceleration (GA).

Seismic oscillations of the ground surface are the main source of errors when measuring the GA using a BLG. Gravimeters with the symmetrical way of measuring have a relatively short bump of the catapult, which causes basis oscillations, called auto-seismic. Systematic error of measuring the GA appears due to such the oscillations. In addition, it is necessary to take into account the influence of the discretization noises that appear when measuring trajectory parameters of the test body.

The least squares (LS) method, traditionally used in ballistic gravimeters, is optimal only for the case of uncorrelated additive noise and under the condition of homoscedasticity. The mentioned conditions are not met for ballistic gravimetry. Thus, the problem of developing new methods of signal processing in a BLG is relevant.

Our main attention is focused on synthesizing gravimeter weight functions aimed at minimizing the influence of the following types of additive noise: 1) external seismic noise; 2) auto-seismic noise; 3) discretization noise.

A combination of quality factors was used to comprehensively take into account various noises. To determine weights of observation, the weighted least squares (WLS) method was used in this paper. The WLS method allows to use window functions, in particular the Hann window. In contrast to known methods of regression analysis, the form of such the window functions is determined not by variation of the noise variance, but rather to be selected to maximize suppression of the noise impact on the result of measuring the GA.

Properties of gravimeter weight functions are given. Analysis of the impact of the form of the Hann window functions on the factors of noise resistance of the BLG is performed. It was shown that increase in the speed of window function drop from the center to the tails leads to significant decrease in the auto-seismic component of the error of measuring the GA at the expense of some negligible increase in other noise-resistance factors. The impact of omission of observations around the highest point of the test body trajectory on results of GA measurements is investigated. It is shown that fulfillment of the Nyquist condition for the weight function of the gravimeter allows to decrease the auto-seismic component of the GA measurement error.

Keywords: auto-seismic effect, ballistic laser gravimeter, weight function, additive noise, symmetrical way of measuring.

Список литературы

1. Rothleitner Ch., Svitlov S., Merimeche H., Hu H., Wang L.J. Development of new free-fall absolute gravimeters. *Metrologia*, 2009, no. 46, pp. 283–297.
2. Світлов С.М. Методи аналізу та зменшення динамічних похибок балістичних гравіметрів: Автореф. дис. Харків, 2000. 17 с.
3. Занимонский Е.М., Нагорный В.Д. Баллистический гравиметр: подход в рамках теории линейных систем. *Измерительная техника*. 1992. № 3. С. 34–36.
4. Omelchenko A.V., Zanimonskiy Y.M., Vinnichenko A.I., Kupko V.S. Development of Methods for Data Processing in a Rise-and-Fall Gravimeter on the Basis of Polynomial Models. *Static and mobile measurements*. Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry (17–20 September 2013, Saint Petersburg, Russia). Saint Petersburg, 2013, pp. 143–147.
5. Омельченко А.В., Занимонский Е.М., Купко В.С. Влияние шумов дискретизации на точность симметричных баллистических гравиметров. *Український метрологічний журнал*. 2013. № 1. С. 33–39.
6. Омельченко А., Болюх В., Вінніченко О. Автосейсмічна складова похибки симетричного балістичного гравіметра, зумовлена коливаннями фундаменту. *Метрологія та прилади*. 2014. № 3 (47). С. 51–56.
7. Болюх В.Ф., Омельченко А.В., Винниченко А.И. Влияние автосейсмических колебаний фундамента на показания баллистического гравиметра с индукционно-динамической катапульты. *Измерительная техника*. 2015. № 2. С. 19–22.
8. Нагорный В.Д. Обработка данных в баллистическом гравиметре: дис. на соискание уч. степени к.-ф.м.н. Москва, 1993. 108 с.
9. Омельченко А., Вінніченко О., Купко В., Занимонський Є. Застосування квадратичної інтерполяції у процесі опрацювання даних у балістичному гравіметрі. *Метрологія та прилади*. 2013. № 4 (42). С. 50–55.
10. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. Москва: Радио и связь, 2000. 800 с.

References

1. Rothleitner Ch., Svitlov S., Merimeche H., Hu H., Wang L.J. Development of new free-fall absolute gravimeters. *Metrologia*, 2009, no. 46, pp. 283–297.
2. Svitlov S.M. Metodi analizu ta zmeshennya dinamichnih pohibok balistichnih gravimetriv [Methods of analysis and reduction of dynamic errors of ballistic gravimeters: author's abstract of dissertation]. Kharkiv, 2000. 17 p. (in Ukrainian).
3. Zanimonskiy Y.M., Nagorniy V.D. Ballisticheskiy gravimetr: podhod v ramkah teorii lineynykh sistem [Ballistic gravimeter: an approach within the framework of the theory of linear systems]. *Izmeritel'naya tehnika*, 1992, no. 3, pp. 34–36 (in Russian).
4. Omelchenko A.V., Zanimonskiy Y.M., Vinnichenko A.I., Kupko V.S. Development of Methods for Data Processing in a Rise-and-Fall Gravimeter on the Basis of Polynomial Models. *Static and mobile measurements*. Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry (17–20 September 2013, Saint Petersburg, Russia). Saint Petersburg, 2013, pp. 143–147.
5. Omelchenko A.V., Zanimonskiy Y.M., Kupko V.S. Vliyanie shumov diskretizatsii na tochnost simmetrichnykh ballisticheskikh gravimetrov [The influence of sampling noise on the accuracy of symmetric ballistic gravimeters]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2013, no. 1, pp. 33–39 (in Russian).
6. Omelchenko A., Bolyuh V., Vinnichenko O. Avtosejsmichna skladova pohibki simetrichnogo balistichnogo gravimetra, zumovlena kolivanniyami fundamentu [Auto-seismic component of the error of a symmetric ballistic gravimeter caused by basement oscillations]. *Metrologiya ta priladi*, 2014, no. 3 (47), pp. 51–56 (in Ukrainian).
7. Bolyuh V.F., Omelchenko A.V., Vinnichenko A.I. Vliyanie avtoseysmicheskikh kolebaniy fundamenta na pokazaniya ballisticheskogo gravimetra s induktsionno-dinamicheskoy katapultoy [The influence of basement autoseismic oscillations on indications of the ballistic gravimeter with inductive dynamic catapult]. *Izmeritel'naya tehnika*, 2015, no. 2, pp. 19–22 (in Russian).
8. Nagorniy V.D. *Obrabotka danykh v ballisticheskom gravimetre* [Data processing in a ballistic gravimeter]. Thesis for the degree of Ph.D. Moscow, 1993. 108 p. (in Russian).
9. Omelchenko A., Vinnichenko O., Kupko V., Zanimonskiy Y. Zastosuvannya kvadratichnoyi interpoliyaciyi u procesi opracyuvannya danih u balistichnomu gravimetri [Application of quadratic interpolation during the process of processing data in a ballistic gravimeter]. *Metrologiya ta priladi*, 2013, no. 4 (42), pp. 50–55 (in Ukrainian).
10. Proakis J.G. Digital communications. McGraw-Hill, 1995. 928 p. [Tsifrovaya svyaz. Rus. ed. D.D. Klovskiy. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2000. 800 p.].