

Портативный оптоэлектронный датчик вибрации на основе автодинного эффекта в лазерных диодах

© А.В. Рыбалтовский, И.С. Мамаев, Г.О. Даниленко, В.В. Виткин, Е.Э. Попов, А.В. Ковалев

Университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: rybaltovskiiav@gmail.com

Поступила в редакцию 05.05.2025 г.

В окончательной редакции 10.09.2025 г.

Принята к публикации 24.10.2025 г.

Продемонстрирована работа портативного дистанционного оптоэлектронного датчика вибрации на основе автодинного эффекта в лазерных диодах. Датчик обеспечивает измерение параметров вибрации: частоты (от 10 до 500 Hz) с относительной погрешностью 0.08%, амплитуды, скорости и ускорения — с погрешностью 2.66–2.87%.

Ключевые слова: оптоэлектронный датчик, измерение вибрации, лазерный диод, автодинный эффект.

DOI: 10.61011/OS.2025.11.62163.8097-25

Бесконтактный мониторинг параметров вибрации играет важную роль в диагностике состояния промышленного оборудования, оценке структурной целостности зданий и сооружений, изучении динамики машин и конструкций, например в робототехнических и прецизионных системах [1,2]. Традиционные контактные методы, преимущественно использующие акселерометры, накладывают ограничения, связанные с креплением датчика непосредственно к поверхности объекта, что не всегда возможно. Альтернативой контактным методам служат бесконтактные методы, среди которых выделяются оптико-электронные методы, позволяющие получать высокоточные измерения в широком диапазоне параметров вибрации (перемещение, ускорение, скорость).

Среди оптоэлектронных технологий широкое распространение получили лазерные доплеровские виброметры (далее — ЛДВ). Они способны обеспечить высокую достоверность измерений, работая в частотном диапазоне до нескольких мегагерц, с разрешением на уровне пикометров и на расстоянии до сотен метров от объекта [3–5]. Классические ЛДВ обычно строятся на основе интерферометров Майкельсона или Маха—Цендера с использованием лазерного источника, многокомпонентных оптических систем формирования и сведения лучей, а также фотоприемника. Недостатками ЛДВ являются сложность конструкции, высокая стоимость, габариты, что ограничивает их применение в качестве действительно портативных или массово интегрируемых датчиков.

Принципиально иной подход, позволяющий значительно упростить конструкцию и снизить стоимость оптико-электронного виброметра, предполагает использование автодинного эффекта в полупроводниковых лазерных диодах [2,6,7]. Суть эффекта заключается в интерференции излучения, отраженного или рассеянного внешним

объектом, с полем внутри резонатора самого полупроводникового лазера, что приводит к модуляции оптической мощности. Фотодетектором выступает встроенный в корпус лазерного диода фотодиод. Данный фотодиод является конструктивным элементом большинства коммерчески доступных лазерных диодов и выполняет функцию контроля мощности полупроводникового лазера. Объединение источника и приёмника в одном функциональном узле позволяет создать компактный энергоэффективный датчик вибрации с низкой себестоимостью [2]. Следствием такого конструктивного упрощения, однако, являются более скромные, в сравнении с ЛДВ, рабочие характеристики: частотный диапазон, как правило, не превышающий десятков килогерц, разрешение, фундаментально определяемое половиной длины волны лазера ($\lambda/2$), и рабочее расстояние в несколько метров, ограниченное длиной когерентности источника.

Несмотря на привлекательную простоту аппаратной части, основной вызов при создании автодинных виброметров заключается в обработке и интерпретации получаемого автодинного сигнала. Этот сигнал имеет характерную, но часто искаженную пилообразную форму. Его амплитуда, форма и соотношение сигнал/шум сильно зависят от коэффициента отражения объекта, пропускания атмосферной трассы. Существующие алгоритмы обработки зачастую ориентированы на извлечение лишь части вибрационных параметров, требуют сложных вычислений или демонстрируют чувствительность к вариациям формы сигнала. Это затрудняет точное и, что важно, одновременное определение полного набора параметров вибрации (частоты, амплитуды, скорости, ускорения) в реальных условиях эксплуатации с достаточным уровнем достоверности получаемых результатов для практических применений.

Для преодоления указанных трудностей, связанных с искажением формы и изменением амплитуды ав-

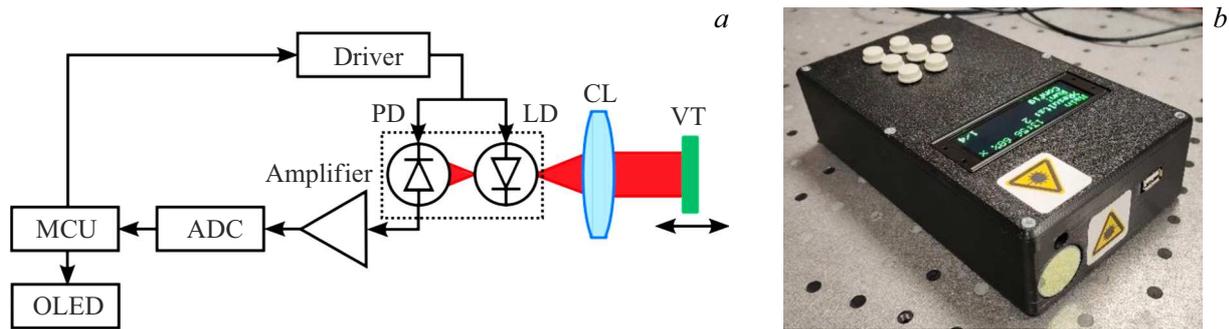


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) разработанного датчика вибрации в корпусе.

тодинного сигнала, в настоящей работе предлагается алгоритм обработки, основанный на анализе временного положения экстремумов (пиков) сигнала. В отличие от методов, требующих анализа полной формы волны, данный подход инвариантен к медленным изменениям амплитуды сигнала, вызванным вариациями оптической обратной связи. Ключевая идея заключается в том, что каждый пилообразный зубец сигнала, независимо от его амплитуды и формы, соответствует смещению объекта на половину длины волны лазерного излучения ($\lambda/2$). Таким образом, детектируя моменты времени появления этих пиков и моменты смены направления движения (инверсии знака производной сигнала), можно с высокой точностью восстановить все параметры вибрации. Такой подход отличается вычислительной простотой, что делает его идеальным для реализации на встраиваемых микроконтроллерах с ограниченными ресурсами, и позволяет создать по-настоящему портативное и недорогое устройство.

Схема и внешний вид портативного оптоэлектронного датчика вибрации представлены на рис. 1. В качестве источника излучения разработанного датчика вибрации был выбран лазерный диод с распределенной обратной связью (далее — РОС-лазер, на схеме обозначен как LD, модель LDI-1550-DFB-2.5G) благодаря его стабильной одномодовой генерации и высокой степени когерентности. В ходе экспериментов РОС-лазер работал на длине волны 1550 nm при рабочем токе накачки 80 mA, что обеспечивало выходную мощность 15 mW. Данный ток более чем в 6 раз превышал пороговый (~ 12.5 A), гарантируя стабильную работу прибора вдали от режима возникновения низкочастотных флуктуаций. Излучение РОС-лазера коллимировалось с помощью регулируемого коллиматора (CL, модель LTN330). Коллимированное излучение направлялось на вибрирующий объект (VT), отражалось от него и возвращалось обратно в резонатор, где отраженный свет интерферировал с внутрирезонаторным полем. Эта интерференция вызывает модуляцию выходной оптической мощности РОС-лазера, несущую информацию о параметрах вибрации. Изменения оптической мощности детектируются встроенным мониторингом фотодиодом (ФД, PD).

Фототок ФД проходит через трансимпедансный усилитель собственной разработки (на основе микросхемы AD8032ARZ), после чего сигнал напряжения оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП, ADC, микросхема AD9057BRSZ) и передается в микроконтроллер (МК, MCU, микросхема STM32F405ZGT6).

МК обрабатывает полученный цифровой сигнал для расчета параметров вибрации. Кроме того, МК управляет драйвером РОС-лазера (PLD-CW-2000H-ZIF), который задает рабочий ток РОС-лазера. Рассчитанные параметры вибрации могут выводиться на встроенный жидкокристаллический дисплей (OLED).

В рамках теоретической модели автодинного эффекта излучаемая лазером мощность может быть представлена следующим образом [8]:

$$P(\varphi) = P_0(1 + mF(\varphi)), \quad (1)$$

где P_0 — мощность, излучаемая полупроводниковым лазером без оптической обратной связи, m — безразмерный индекс модуляции, характеризующий глубину модуляции мощности и зависящий от количества излучения, вернувшегося в резонатор после отражения от объекта вибрации, $F(\varphi)$ — функция модуляции, $\varphi = 2kS(t)$ — фазовый сдвиг; $S(t) = s_0 + s(t)$, где s_0 — среднее расстояние до объекта измерений, $s(t)$ обусловлено вибрацией.

Анализируемый сигнал демонстрирует периодическую смену экстремумов амплитуды через каждый полупериод, образуя во времени пилообразную форму с выраженными фронтами нарастания и спада. Модуляция амплитуды сигнала имеет вид низкочастотной амплитудной огибающей высокочастотной пилообразной несущей, стабилизированной постоянной мощностью лазерного излучения. Форма и амплитуда сигнала могут значительно меняться в зависимости от условий проведения измерений, что создаёт существенные трудности в его обработке. При увеличении количества света, возвращающегося обратно в лазерный диод, увеличивается и обратная оптическая связь, что влияет на сигнал. Примеры таких сигналов представлены на рис. 2. На рис. 2, а датчик отклонен на больший угол относительно нормали к вибрирующему объекту в сравнении с рис. 2, б.

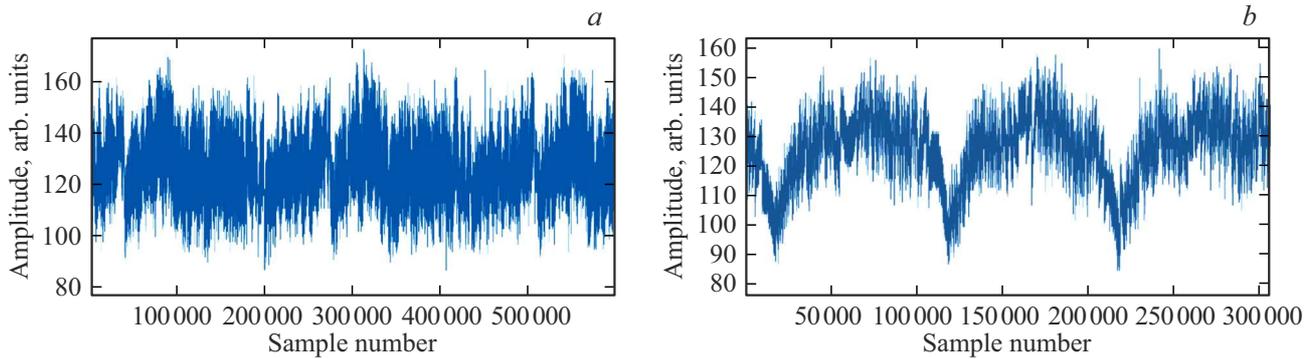


Рис. 2. Оцифрованные автодинные сигналы для возрастающей от (а) к (b) силы обратной оптической связи. По оси абсцисс отложен номер отсчета (для (а) и (b) использовались частоты дискретизации АЦП 4.2 МГц и 2 МГц соответственно), по оси ординат — амплитуда сигнала в относительных единицах. Расстояние до объекта 250 мм, частота вибрации 20 Гц.

Каждый пик высокочастотной пилообразной структуры сигнала возникает вследствие изменения фазы сигнала обратной связи на 2π , что соответствует изменению полного оптического пути „лазер–объект–лазер“ на одну длину волны (λ). Следовательно, каждый наблюдаемый пилообразный пик в сигнале является индикатором перемещения вибрирующего объекта вдоль оси зондирования на расстояние, строго равное половине длины волны излучения используемого лазера ($\lambda/2$). При этом также имеется прямая зависимость знака наклона (первой производной) регистрируемого сигнала от направления мгновенной скорости объекта относительно датчика [8]. Смена направления движения объекта приводит к инверсии знака производной автодинного сигнала. Поскольку при гармонических или квазипериодических колебаниях смена направления скорости происходит в точках максимального и минимального смещения, эти точки являются границами полупериодов вибрационных колебаний и могут быть идентифицированы по моментам смены знака производной автодинного сигнала.

Данное свойство лежит в основе алгоритма обработки оцифрованного автодинного сигнала. Для определения и автоматизированного подсчета количества пиков используется вычисление первой производной сигнала. С целью подавления высокочастотного шума, который может приводить к ложным срабатываниям при дифференцировании, исходный сигнал был предварительно сглажен методом скользящего среднего с размером окна 7 отсчетов. Затем для сглаженного сигнала вычислялась первая производная. Резкие перепады интенсивности, соответствующие изменению расстояния на $\lambda/2$, соответствуют пикам производной сигнала. Данные пики детектировались путем сравнения модуля значения производной с пороговым, которое определялось как среднее значение модуля всех пиков. Для каждого n -го пика также определялась координата времени t_n . Моменты времени, в которые происходит инверсия знака производной, соответствуют полупериоду. Таким образом, детектирование пиков позволяет определять период и основную частоту вибрационных колебаний без

привлечения быстрого преобразования Фурье в случае, когда микроконтроллер имеет ограниченные вычислительные ресурсы.

Полученный массив пиков и соответствующих моментов времени используется также для извлечения из автодинного сигнала параметров вибрации. Амплитуда вибрации объекта определяется как

$$A(t) = kN\frac{\lambda}{2}, \tag{2}$$

где k — поправочный коэффициент, получаемый в ходе калировки устройства, λ — длина волны излучения лазера, N — количество пиков за один полупериод, определяемое как частное от деления общего количества найденных пиков N_p на количество детектируемых полупериодов $N_{T/2}$:

$$N = N_p/N_{T/2}. \tag{3}$$

Скорость и ускорение рассчитываются по формулам

$$v_n(t) = k\frac{\lambda}{2(t_n - t_{n-1})}, \tag{4}$$

$$a_n(t) = \frac{v_n(t) - v_{n-1}(t)}{t_n - t_{n-1}}, \tag{5}$$

где $v_n(t)$ и $a_n(t)$ — мгновенные скорость и ускорение объекта, рассчитанные для n -го временного интервала, $v_n(t)$ — мгновенная скорость, рассчитанная на предыдущем шаге, t_n и t_{n-1} — моменты времени, соответствующие n -му и $(n - 1)$ -му детектированным пикам сигнала.

В качестве вибрирующего объекта VT в экспериментальных исследованиях использовался низкочастотный динамик, мембрана которого служила источником контролируемых вибраций, к поверхности которой была прикреплена алюминиевая фольга. Коэффициент отражения использованной фольги составляет приблизительно 80% для длины волны излучения 1550 нм. Исследование проводилось с использованием разработанного оптического датчика вибрации. Измерения выполнялись

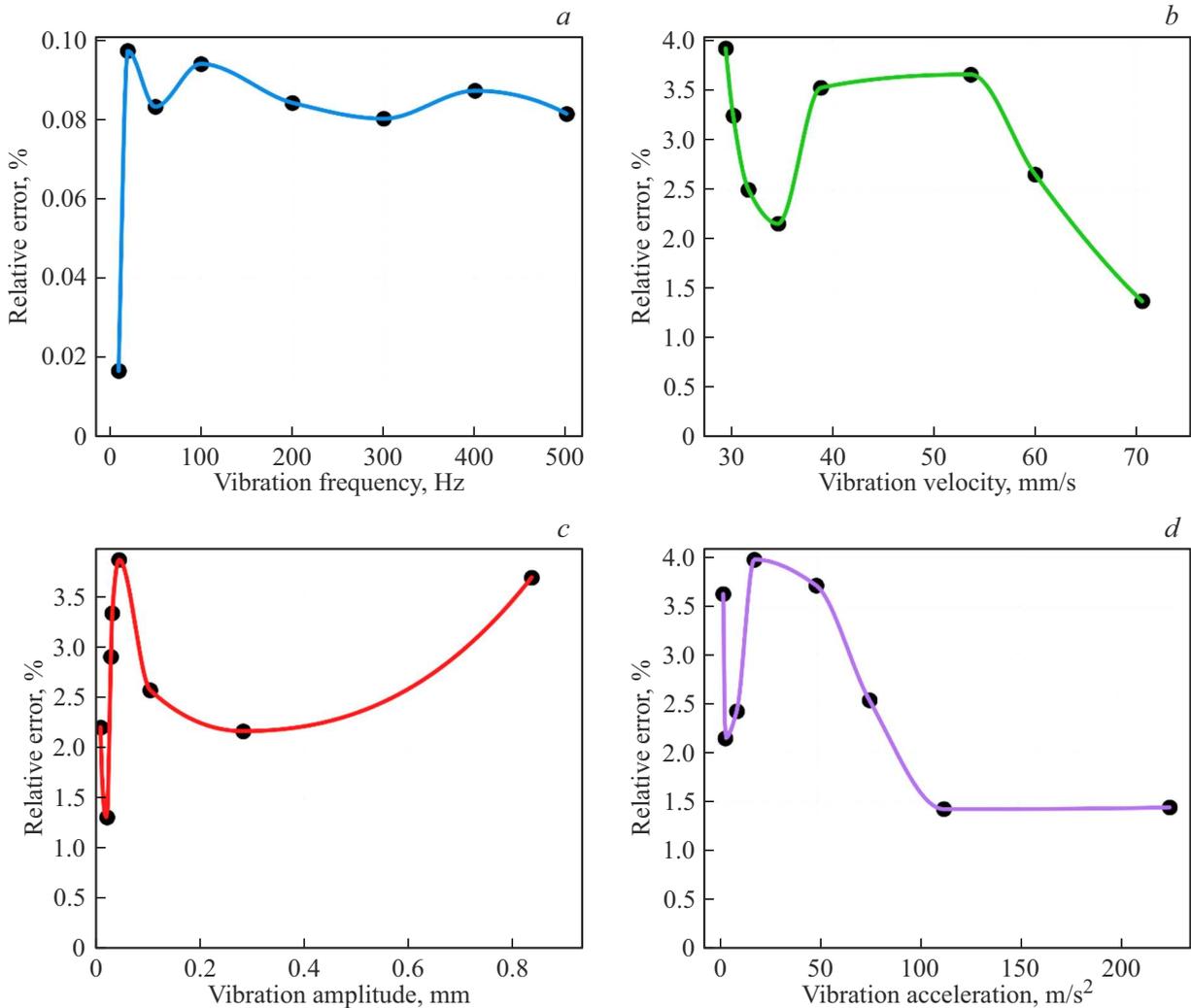


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности измерения от абсолютного значения измеряемого параметра вибрации для частоты (а), скорости (b), амплитуды (с), ускорения (d) вибраций.

бесконтактным методом, среднее расстояние до поверхности вибрирующего объекта — 250 мм.

Гармонические колебания мембраны динамика задавались с помощью генератора сигналов АКПП-3420/1. Была проведена серия измерений при частотах колебаний 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500 Hz и их амплитудах 0.83, 0.28, 0.1, 0.045, 0.032, 0.031, 0.0225 mm.

Для каждой комбинации частоты и амплитуды выполнялось по четыре независимых измерения. Относительная погрешность измерений рассчитывалась по формуле

$$\delta_A = \frac{X_m - X_r}{X_r}, \tag{6}$$

где X — один из измеряемых параметров (частота, амплитуда, скорость или ускорение), а X_m и X_r — соответственно его измеренное и истинное значения.

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что погрешности определения параметров вибрации не превышали

- для частоты вибрации — 0.08% (рис. 3, a),
- для скорости вибрации — 2.87% (рис. 3, b),
- для амплитуды вибрации — 2.75% (рис. 3, c),
- для ускорения вибрации — 2.66% (рис. 3, d).

Важно отметить, что если точность измерения частоты остается стабильно высокой во всем рабочем диапазоне, то погрешности определения других параметров демонстрируют явную зависимость от их величины. Такое поведение имеет физическое объяснение, связанное с особенностями обработки автодинного сигнала: высокая погрешность при измерении малых амплитуд и ускорений является следствием эффекта квантования и усиления шумов при численном дифференцировании соответственно, а U -образная зависимость для скорости определяется балансом между влиянием низкочастотных шумов и полосой пропускания системы.

Известно, что параметры автодинного сигнала, включая его форму и амплитуду, существенно зависят от расстояния до объекта и коэффициента обратной связи.

При определенных условиях, особенно при слабой и умеренной обратной связи, могут возникать режимы низкочастотных флуктуаций интенсивности, которые потенциально могут быть ошибочно приняты за пики, связанные с вибрацией. В наших экспериментах данный эффект не наблюдался. Это было достигнуто благодаря стабильности вибрирующего объекта и, что более важно, благодаря работе системы в режиме сильной оптической обратной связи, который обеспечивался выбором соответствующих экспериментальных параметров (высокий коэффициент отражения цели, рабочий ток, шестикратно превышающий пороговое значение). Однако исследование влияния расстояния на точность измерений и разработка адаптивных алгоритмов, устойчивых к таким явлениям, является важной задачей для дальнейшей работы. Кроме того, максимальное рабочее расстояние датчика ограничено длиной когерентности используемого лазера. Для РОС-лазеров данного класса длина когерентности обычно составляет несколько метров. Таким образом, в проведенных экспериментах при расстоянии до объекта 250 mm работа системы была далека от фундаментальных ограничений, накладываемых когерентностью излучения.

Подводя итоги, в работе представлены результаты экспериментальной апробации компактного дистанционного оптоэлектронного датчика вибрации на основе автодинного эффекта в лазере с распределенной обратной связью, излучающем на длине волны 1550 nm. Предложенный метод обработки сигнала, основанный на анализе временного положения экстремумов, позволяет извлекать из оцифрованного автодинного сигнала параметры вибрации частоты, амплитуды, скорости и ускорения вибрации. Относительная погрешность измерения частоты составила менее 0.1%, погрешности измерения амплитуды, скорости и ускорения составили менее 3%. Представленные результаты показывают перспективность использования датчиков на основе автодинного эффекта для создания недорогих, портативных и встраиваемых решений для бесконтактного мониторинга вибраций.

Благодарности

Авторы выражают особую благодарность Евгению Зинченко за его вклад в разработку и отладку аналого-цифровой части датчика.

Финансирование работы

Работа по проектированию оптической и электронной части датчика выполнена при финансовой поддержке Университета ИТМО в рамках проекта № 423020 ПО НИОКТР. Работа по обработке экспериментальных данных выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSER-2025-0025).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Xu, B. Liu, J. Wang, Y. Wang, Y. Li. *Sensors*, **23** (22), 9196 (2023). DOI: 10.3390/S23229196
- [2] S. Donati. *Vib.*, **6** (3), 625 (2023). DOI: 10.3390/VIBRATION6030039
- [3] P. Chiariotti, C. Rembe, P. Castellini, M. Allen. In: *Handb. Exp. Struct. Dyn.*, ed. by M. Allen (Springer, N.Y., 2020), p. 1. DOI: 10.1007/978-1-4939-6503-8_4-1
- [4] Y. Zeng, A. Núñez, Z. Li. *Mech. Syst. Signal Process.*, **178**, 109196 (2022). DOI: 10.1016/J.YMSSP.2022.109196
- [5] S.J. Rothberg, M.S. Allen, P. Castellini, D. Di Maio, J.J.J. Dirckx, D.J. Ewins, B. Halkon, P. Munro, S. Pai, F. Tomasini, N.A.J. van der Knaap, D. Virden, L. Zizheng. *Opt. Lasers Eng.*, **99**, 11 (2017). DOI: 10.1016/J.OPTLASENG.2016.10.023
- [6] G. Giuliani, S. Bozzi-Pietra, S. Donati. *Meas. Sci. Technol.*, **14** (1), 24 (2002). DOI: 10.1088/0957-0233/14/1/304
- [7] D. Han, M. Wang, J. Zhou. *Opt. Express*, **14** (8), 3312 (2006). DOI: 10.1364/OE.14.003312.
- [8] L. Scalise, Y. Yu, G. Giuliani, G. Plantier, T. Bosch. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **53** (1), 223 (2004). DOI: 10.1109/TIM.2003.822194