ОБРАБОТКА ДАННЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

Пальчик О.В., Андреев В.Г.,

Рязанская государственная радиотехническая академия
391000, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, кафедра РТС
E-male: rts@rgrta.ryazan.ru; vlad@express.ryazan.ru

Реферат. Предлагается метод нахождения оценки положения энергетического центра одиночного импульса, позволяющий уменьшить дисперсию данной оценки по сравнению с аналогичным показателем метода центра тяжести. Особенностью предлагаемого метода является исключение предварительной пороговой обработки.

В технической диагностике широко используются оптические измерители, среди которых важное место занимают лазерные триангуляционные дальномеры. Они эффективны при небольших (до метра) расстояниях между диагностируемым объектом и датчиком, позволяя достичь разрешения в единицы микрон. Принцип работы триангуляционных измерителей основан на определении местоположения центра импульса, образованного проекцией отражения лазерного луча от контролируемого объекта на линейный фотоприемник, состоящий из N элементов. Импульс смещается вдоль фотоприемника, определяя своим местоположением измеряемый параметр – расстояние до объекта в одной точке. Выбор метода для поиска центра импульса основан на компромиссе между допустимыми погрешностями и необходимым быстродействием измерительной системы. Ниже производится сравнение различных методов по точности и вычислительным затратам. Результаты получены на моделированных стохастических последовательностях **s** длиной N в виде одиночных импульсов **x** с аддитивным гауссовским шумом **n**: **s** = **x** + **n**.

Методы поиска центра импульса можно разделить на две основные группы – на требующие предварительной пороговой обработки и не требующие. К последним методам относится, например, **аппроксимация по методу наименьших квадратов** [1]. Она позволяет получить наиболее качественные оценки, близкие к потенциальным. Очевидный недостаток данного метода заключается в значительных вычислительных затратах на его реализацию, обусловленных необходимостью обращения матрицы размера $m \times m$, где m – порядок аппроксимирующего полинома, и процедурой поиска местоположения глобального максимума.

Среди методов требующих пороговую обработку наибольшее распространение получили метод центра тяжести и медианный метод, т.к. оба эти метода могут быть реализованы в реальном масштабе времени. Общим недостатком данных методов является необходимость пороговой обработки, поскольку адаптация уровня порога к сигналу **s** задача неоднозначная и всегда приводит к увеличению вычислительных затрат.

Поиск энергетического центра $\hat{M}$ импульса **x методом центра тяжести** интерпретируется как координата среднего геометрического последовательности **s**:

$$\hat{M} = \sum_{g=0}^{N-1} g \cdot s[g] \Big/ \sum_{g=0}^{N-1} s[g], \tag{1}$$

где $s[g]$ – отсчеты анализируемой последовательности **s**. Оценка $\hat{M}$ обладает высокой субпиксельной точностью, но характеризуется значительной дисперсией и смещением к величине $N/2$ при наличии ненулевой постоянной составляющей. Исключение смещения достигается пороговой обработкой.

Медианный метод основан на поиске медианы импульса, т.е. номера отсчета g, слева и справа от которого, площади импульса равны. Медианная оценка обеспечивает точность до 0,5 пикселя, что часто является недостаточным. Отметим, что смещение оценки по медианному методу несколько ниже, чем у метода центра тяжести, однако при симметричном импульсе и пороговой обработке оба этих метода дают близкие результаты.

Отметим, что в случае неизменной формы и площади импульса, а также постоянной интенсивности шума смещение может быть компенсировано на этапе калибровки оптического измерителя за счет уменьшения разрешения измерительной системы. Подобная калибровка исключает необходимость пороговой обработки. Таким образом, в качестве главных количественных характеристик методов можно определить вычислительные затраты на их реализацию и достигаемую дисперсию или среднеквадратическое отклонение СКО оценки.

Рассмотрение этих характеристик известных методов показывает, что на практике реализуются лишь крайние возможности – высокое быстродействие и простота реализации при низком качестве оценок или наоборот. Это делает актуальным поиск метода, занимающего промежуточное положение, который позволяет приблизиться к качеству потенциальной оценки при использовании приемлемых по вычислительным затратам процедур. Проведем исследование метода **центра тяжести**, обладающего высокой точностью, выявив пути его реализации, исключающие пороговую обработку.

Поскольку в (1) знаменатель служит для нормировки **s**, то значимым для точности алгоритма является только числитель, который можно понимать как циклическую свертку последовательностей **g** и **s** длиной N для индекса сдвига $j = 0$:

$$v[j] = \sum_{g=0}^{N-1} g \cdot s[(g + j) \operatorname{mod} N]. \tag{2}$$

Рассмотрим выходную нормированную последовательность (рис. 1, *а*) свертки (2) для индексов сдвига $j = 0 \ldots N-1$, где последовательность **s** представлена в виде сигнала колокообразной формы с центром в точке M_1 (рис. 1, *б*).

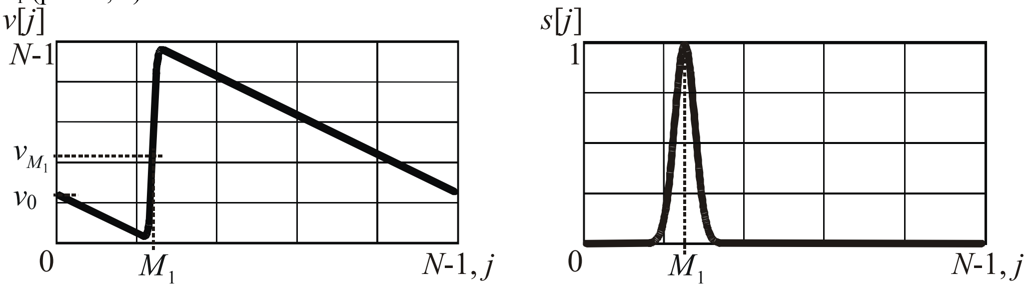

Рис. 1

На рис. 1, *а* указано значение свертки v_0, соответствующее индексу сдвига $j = 0$. Значение v_0 после нормировки является оценкой $\tilde{M} = M_1$ по методу центра тяжести. В то же время, по оси абсцисс можно видеть индекс сдвига $j = M_1$, которому соответствует значение v_{M_1}. Отметим большую крутизну этого участка кривой **v** по сравнению с участком вблизи 0-го индекса. Можно сделать предположение, что, если находить оценку $\tilde{M}_1 = M_1$ как координату точки пересечения кривой **v** с уровнем v_{M_1}, то мы получим меньшее СКО оценки $\tilde{M}_1$ по сравнению с разбросом значений v_0. Проверим это.

На рис. 2 штриховкой показана область значений свертки (2) с учетом нормировки.

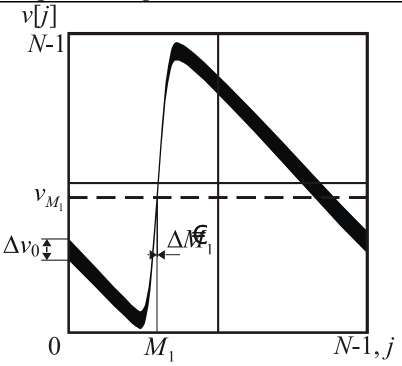

Рис. 2

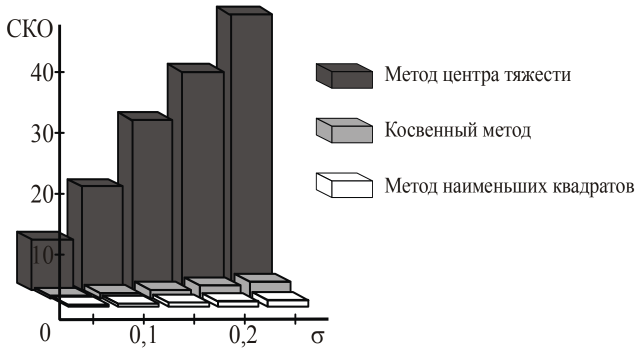

Рис. 3

Как видно из рис. 2, оценка $\tilde{M}_1$ имеет заметно меньший разброс значений – $\Delta\tilde{M}_1$ по сравнению с разбросом Δv_0 оценки v_0 . Для реализации предлагаемого алгоритма требуется найти v_{M_1} .

В силу цикличности свертки (2), форма кривой **v** никак не меняется при изменении значения M_1, а изменяется только индекс сдвига, от которого начинается отсчет значений **v**. Таким образом, при изменении M_1, величина v_{M_1} пропорционально изменяется в пределах линейных участков от минимального до максимального своего значения, а при $M_1 = N / 2$:

$$v_{M_1} = v_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} v[j]. \tag{3}$$

Полученный вывод (3) можно обобщить на все значения M_1, исключая начальный и конечный участки последовательности **s**, соответствующие нелинейным участкам кривой **v**.

Таким образом, получен косвенный метод нахождения положения энергетического центра из свертки (2) не требующий пороговой обработки в силу вхождения постоянной составляющей в (3). Предлагаемый косвенный метод реализуется по следующему алгоритму: 1) вычисляется циклическая свертка (2) последовательностей; 2) вычисляется средний уровень (3) циклической свертки; 3) сравниваются значения циклической свертки со средним уровнем; 4) обнаруживаются два индекса – до и после пересечения «снизу» циклической сверткой среднего уровня; 5) производится линейная интерполяция участка между индексами, обнаруженными в п. 4, с использованием свойства подобных треугольников, и рассчитывается добавка к младшему индексу для получения субпиксельной точности.

Очевидно, что дисперсия оценки зависит от соотношения мощностей сигнала и шума, поэтому для количественного описания выигрыша примем характерный для триангуляционных измерителей сигнал длиной $N = 1024$, который описывается гауссовой кривой с аддитивным шумом:

$$x_j = \exp\left\{-\frac{(j-M_1)^2}{2L^2}\right\},\ s_j = x_j + n_j = \begin{cases} 0, & s_j < 0 \\ s_j, & s_j \geq 0 \end{cases}, \qquad (4)$$

где $L = 0{,}02N$ – полуширина импульса, а нормальный шум **n** имеет нулевое среднее значение и дисперсию σ^2. На рис. 3 приведены зависимости СКО оценок от σ шума.

Как видно из рис. 3, СКО оценок всех методов линейно зависят от σ шума. Однако косвенный метод позволяет получить значительный выигрыш по сравнению с методом центра тяжести, приближаясь к потенциальной точности. Основой предлагаемого алгоритма является процедура вычисления циклической свертки, которая может быть реализована, например, как быстрая свертка с использованием преобразования Хартли [2].

Можно отметить, что поиск центра импульса по предлагаемому алгоритму для случая $\mathbf{n} = 0$ приводит к результату, совпадающему с медианным методом, и, в силу отсутствия поставленных ограничений, обобщим этот результат на случаи ненулевого шума. В результате можно сделать вывод, что оценка $\tilde{M}_1$ имеет меньшее смещение при искажениях импульса, делающих его несимметричным.

Таким образом, косвенный метод сочетает в себе достоинства рассмотренных выше наиболее популярных методов, а именно: косвенный метод не требует пороговой обработки; обеспечивает субпиксельную точность; сравнительно просто реализуем.

Для примера (4) сигнала **s** дисперсия оценки уменьшается в 16 раз по сравнению с методом центра тяжести. Смещение оценки исключается, а вычислительные затраты на реализацию предлагаемого косвенного метода составляют $2N$ умножений против $(n^3 + 2nN)$ умножений в процедуре аппроксимации по методу наименьших квадратов [1].

Литература

1. Плескунин В. И., Воронина Е. Д. Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте / Под ред. Башарина А. В.– Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1979.– 232 с.
2. Брейсуэл Р. Преобразование Хартли: Пер. с англ.– М.: Мир, 1990.– 175 с.