

## АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

*Досліджені методи нелінійної оптимізації для оцінки місця розташування джерела звуку в акустичних сенсорних мережах. Проведено модельний комп'ютерний експеримент для мережі з 12 мікрофонів. Встановлено, що найбільш придатними для практичного застосування є алгоритми нелінійних найменших квадратів, зокрема методи Гауса-Ньютона і Левенберга-Марквардта.*

*Исследованы методы нелинейной оптимизации для оценки местоположения источника звука в акустических сенсорных сетях. Поставлен модельный компьютерный эксперимент для сети из 12 микрофонов. Установлено, что наиболее пригодными для практического применения являются алгоритмы нелинейных наименьших квадратов, в частности методы Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта.*

*Methods of nonlinear optimisation for an estimation of a sound source position with acoustic sensor networks are studied. Simulating computer experiment for a network from 12 microphones is put. It is established that the most suitable for practical application are algorithms of nonlinear least squares, in particular Gauss-Newton method and Levenberg-Marquardt algorithm.*

Акустические сенсорные сети (АСС) представляют собой конечное множество распределенных в двумерном пространстве или в трехмерном объеме акустических сенсоров (микрофонов), предназначенных для обнаружения и определения координат источника звука в зоне чувствительности сенсоров. Предполагается, что все сенсорные элементы АСС имеют каналы связи с центром (или распределенными центрами) обработки измерительной информации. В последние годы АСС стремительно развиваются и получили широкое распространение в самих различных прикладных и специальных технологиях: определение местоположения говорящего человека (видеоконференции, робототехника, проекты «умный дом»), обнаружение и локализация течей в оборудовании высокого давления (мониторинг агрегатов АЭС и магистральных трубопроводов), проекты по охране живой природы (наблюдение за исчезающими видами фауны, мониторинг браконьерства в заповедниках и национальных парках), специальные и контртеррористические применения (обнаружение выстрелов из артиллерийских орудий и стрелкового оружия, огневых позиций, боевых машин и летательных аппаратов) [5].

Практически во всех применениях к АСС предъявляются сходные требования по качеству АСС как информационной измерительной системы: максимально возможное быстродействие при обнаружении и оценке местоположения источника звука, высокое качество обнаружения и минимально возможная ошибка оценивания координат. Все эти показатели качества должны обеспечиваться при реально наблюдаемых отношениях сигнал/шум. Особое внимание при этом уделяется оценке координат источника в реальном масштабе времени. Алгоритмам, удовлетворяющим этим требованиям, и посвящено данное исследование.

Наиболее популярным методом оценки местоположения источника звука в АСС является метод разностей времен приходов (РВП). Он состоит из двух этапов. На первом сигналы, принимаемые каждым из микрофонов сети, обрабатываются для получения информации о РВП сигнала от источника на каждую пару микрофонов. Для этого, как правило, используют взаимно-корреляционную функцию (ВКФ) сигналов, принимаемых каждой парой микрофонов. На втором этапе оцененные значения РВП используются для локализации источника звука.

Пусть в АСС имеется  $M$  пар микрофонов. Для каждой пары микрофонов известны

их координаты:  $\mathbf{m}_i^1 = (x_i^1, y_i^1, z_i^1)$  и  $\mathbf{m}_i^2 = (x_i^2, y_i^2, z_i^2)$  для  $i \in [1, M]$ . Пусть истинные координаты источника  $\mathbf{s} = (x_0, y_0, z_0)$ . Тогда истинная задержка сигнала от источника  $\mathbf{s}$  на  $i$ -й паре микрофонов равна:

$$T_i(\mathbf{s}) = \frac{\sqrt{(x_0 - x_i^1)^2 + (y_0 - y_i^1)^2 + (z_0 - z_i^1)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x_0 - x_i^2)^2 + (y_0 - y_i^2)^2 + (z_0 - z_i^2)^2}}{c},$$

где  $c=341$  м/с – скорость звука в воздухе.

Пусть оцененная в условиях шумов и реверберации РВП для  $i$ -й пары микрофонов равна  $\tau_i$ . Тогда для  $M$  пар микрофонов можно сформулировать задачу оценки местоположения источника  $\hat{\mathbf{s}}$  как задачу нелинейной минимизации

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s}} (J(\mathbf{s})),$$

где  $J(\mathbf{s})$  - целевая функция задачи минимизации

$$J(\mathbf{s}) = \sum_{i=1}^M [\tau_i - T_i(\mathbf{s})]^2.$$

Можно показать, что для нормально распределенной случайной величины  $\tau_i$  оценка  $\hat{\mathbf{s}}$  является максимально правдоподобной [4].

Для анализа способов решения системы уравнений нелинейной минимизации был поставлен модельный эксперимент, в определенной мере основанный на методике [4], однако с устранением ее ошибок и недоработок. В частности, была смоделирована ситуация оценки координат источника протечки  $\hat{\mathbf{s}}$  в условиях помещения атомной электростанции (АЭС) (рис.1)

В помещении размерами 8x8x8(м) источник звука расположен в центре помещения. На стенах помещения, которые в данном частном случае считаются абсолютно поглощающими (реверберация отсутствует), в точках с известными координатами расположены 12 микрофонов, которые образуют  $(12 \times 11) / 2 = 66$  пар. Микрофоны сгруппированы в три конструктивные группы исключительно для имитации реального их расположения в помещениях АЭС.

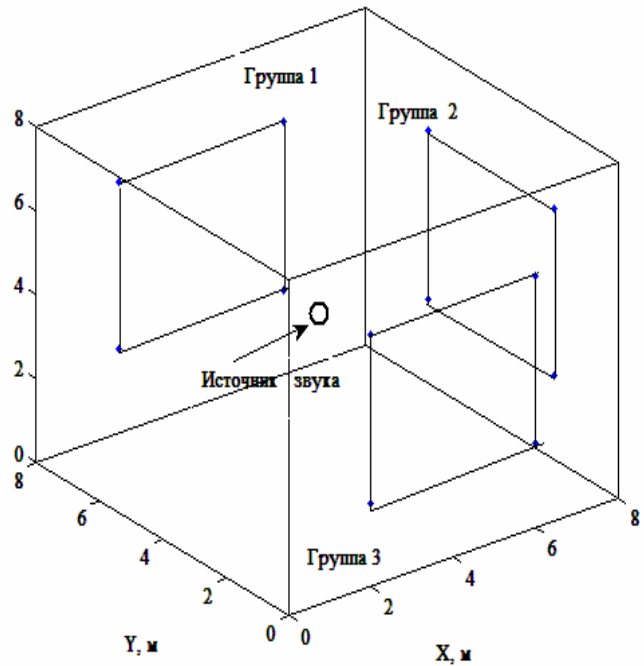


Рис.1. Схема компьютерного модельного эксперимента

В качестве источника звука использовался реальный сигнал, зарегистрированный на экспериментальном стенде, имитирующем оборудование АЭС с микротечью при температуре 220<sup>0</sup>С при давлении 7,2 МПа. Сигнал представляет собой широкополосный шум с примерно розовым спектром, лежащим в частотном диапазоне 1—25 кГц, и уровнем звукового давления, приведенным к расстоянию 1 м, равным 85 дБ. Для имитации помеховой обстановки на сигнал наложен гауссовский белый шум таким образом, что отношение сигнал/шум (ОСШ) составляет 5 децибел.

Из акустических эффектов, присутствующих в помещении, промоделированы сферическое расхождение и физическое затухание. Для каждой пары микрофонов (из 66 имеющихся) получены оценки РВП  $\tau_i$ ,  $i \in [1, 66]$  по положению максимума взаимнокорреляционной функции сигналов, принимаемых каждой парой микрофонов.

Далее различными методами решалась описанная выше задача минимизации, в результате чего получена оценка местоположения источника  $\hat{\mathbf{s}}$  и рассчитана среднеквадратичная ошибка (СКО) по известным в

модельном эксперименте координатам источника.

Для решения нелинейной задачи оптимизации использованы различные методы, проведено моделирование исследования [1].

1. Метод Нелдера-Мида (НМ), также известный как метод деформируемого многогранника, и симплекс-метод, — метод безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, не использующий производных функции, а поэтому легко применимый к негладким и/или зашумлённым функциям.

2. Квазиньютоновские методы. Эти методы оптимизации требуют использования матрицы Гессе  $H$ , образованной вторыми частными производными целевой функции. Вычисление матрицы Гессе требует большого объема компьютерных вычислений, поэтому разработаны специальные схемы, итеративно вычисляющие не матрицу  $H$ , а ее обновление. К ним, в частности, относятся алгоритм Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (БФГШ) и метод Давидона-Флетчера-Пауэлла (ДФП).

3. Нелинейные методы наименьших квадратов. Сформулированная выше задача нелинейной оптимизации, собственно, есть нелинейная задача наименьших квадратов. Для такой задачи матрицы градиентов и Гессе имеют специальную структуру. На этом основаны алгоритмы Левенберга-Марквардта (ЛМ) и Гаусса-Ньютона (ГН).

Результаты моделирования приведены в таблице.

Результаты моделирования определения координат источника путем 300 прогонов решения задачи нелинейной оптимизации

Методы нелинейной минимизации	СКО определения координат источника (м)	Кол-во итераций для получения решения	Количество вычислений целевой функции
НМ	$5,26 \cdot 10^{-7}$	288	543
БФГШ	$6,34 \cdot 10^{-4}$	27	114
ДФП	$2,22 \cdot 10^{-2}$	68	286
ГН	$6,11 \cdot 10^{-7}$	6-7	52
ЛМ	$8,56 \cdot 10^{-5}$	7-8	73

Анализ таблицы показывает следующее. Метод Давидона-Флетчера-Пауэлла дает практически неприемлемые по точности результаты по сравнению с другими методами нелинейной оптимизации. С точки зрения точности местоопределения источника, наилучшим является метод Нелдера-Мида, однако он является наихудшим по количеству итераций и числу вычислений целевой функции, а следовательно является абсолютно неконкурентным с точки зрения скорости вычислений. Метод Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно показал достаточно высокую скорость вычислений, но по точности он проигрывает методу Нелдера-Мида.

Нелинейные методы наименьших квадратов показали как высокую точность оценивания координат, так и достаточно высокое быстродействие. Метод Гаусса-Ньютона превосходит метод Левенберга Марквардта, потому он может быть рекомендован как наилучший алгоритм решения задачи.

Другим способом повышения качества работы алгоритмов оптимизации является использование символьной компьютерной математики для решения задачи нелинейной оптимизации. В частности, была использована система символьной математики Maple [2] для вычисления матрицы Гессе и применения ее в явном аналитическом виде для использования в квазиньютоновских методах.

Вычислительные эксперименты показали, что скорость квазиньютоновских методов удастся повысить за счет снижения количества итераций до 20-25, а числа вычислений целевой функции до 40-50.

Как известно, успех в решении задач нелинейной оптимизации в значительной мере зависит от выбора начального приближения [1]. В этом аспекте подобные задачи даже называют «искусством нелинейной оптимизации». В приведенном выше вычислительном эксперименте начальное положение источника звука выбиралось в пределах 25—30%-ного отклонения от истинного местоположения источника, которое в модельном эксперименте известно. Однако выбор совершенно случайного начального приближения часто приводил к катастрофическим результатам: сходимость его сохранялась, но

вместо истинного положения источника находился не имеющий к нему отношения локальный максимум целевой функции.

Для решения вопроса было предложено следующее. Известно аналитическое решение Бучера-Мистры для определения местоположения источника в трехмерном пространстве по трем значениям  $\tau_i$  [3]. Это решение дает хорошие результаты только для очень высоких отношений сигнал/шум. Однако использование его в качестве начального приближения для решения задачи нелинейной оптимизации коренным образом меняет ход вычислительного процесса: при применении практически любых алгоритмов итерационный процесс сходится не более, чем за 20-30 итераций с малым числом вычислений целевой функции.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Методы нелинейной оптимизации являются достаточно эффективными для определения местоположения источника звука с помощью акустических сенсорных сетей как с точки зрения точности, так и с точки зрения минимизации вычислительных затрат и скорости вычислений. В качестве направления дальнейших исследований отметим изучение их эффективности при низких отношениях сигнал/шум, а также в условиях реверберации, которые проявляются при решении практических задач.

#### Список использованной литературы

1. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
2. Дьяконов В. П. Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании / Дьяконов В. П. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 720 с.
3. Bucher R., Misra D. A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-dimensional Hyperbolic Positioning System // VLSI Design. – 2002. – Vol.15(2). – P. 507-520.
4. Raykar V.C., Kozintsev I.V., Lienhart R. Position Calibration of Microphones and Loudspeakers in Distributed Computing Platforms // IEEE Transactions on Speech and Audio Processing. – 2005. – No.1. – P. 70-83.
5. Cevher V., Kaplan L.M. Acoustic sensor network design for position estimation // ACM Trans. Sen. Netw. – 2009. – N 3. – P.1-28.

Получено 20.07.2010



Болтенков  
Виктор Алексеевич,  
канд. техн. наук, доцент каф.  
информационных систем  
Одес.нац.политехн.ун-та  
e-mail: vaboltenkov@mail.ru  
тел. 734-83-36