УДК 519. 7004. 62

Т.А. САМОЛЮК, В.С. ЛОСЬ

# РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ ПРИ ШУМОПЕЛЕНГОВАНИИ В СИСТЕМЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

*T. Samolyuk, V. Los*

***SOLVING THE RANGE EQUATIONS OF TARGET DETECTION IN NOISE DIRECTION-FINDING MODE IN A SYSTEM OF HYDROACOUSTIC CALCULATIONS***

*The description of the range equations of target detection solving in noise direction-finding mode in system of hydroacoustic calculations was given.*
*Key words: noise direction finding, the discrepancy, range equation.*

*Описано розв'язок рівнянь дальності виявлення цілі при шумопеленгуванні у системі гідроакустичних розрахунків.*
*Ключові слова: шумопеленгування, нев'язка, рівняння дальності.*

*Описано решения уравнений дальности для обнаружения цели при шумопеленговании в системе гидроакустических расчетов.*
*Ключевые слова: шумопеленгование, невязка, уравнение дальности.*



**Введение.** Как известно, Украина является морским государством, имеет государственные интересы (защита морских границ, обеспечение безопасности судоходства, разведка, добыча и транспортировка минерального сырья с морского дна, использование биологических ресурсов и др.) в Азово-Черноморском регионе, а в перспективе и в других районах Мирового океана. Развитие гидроакустической отрасли (науки и приборостроения), как основы использования собственного географического и геополитического положения, является приоритетным для безопасности Украины и должно быть стратегической задачей для морской доктрины государства [1].

Глобальной проблемой гидроакустики является создание единой математической теории расчетов и интерпретации гидрофизических полей в океане, вполне адекватной естественным соотношениям и потребностям практики. Гидроакустические станции шумопеленгования целей относятся к классу систем пассивной гидролокации, с помощью которых осуществляется выявление акустических сигналов, создаваемых любыми объектами в водной среде.

**Общая часть.** В процессе обработки данных, полученных с помощью гидроакустических станций шумопеленгования целей, приходится иметь дело с решением уравнений дальности обнаружения целей. Аналитическое решение уравнения дальности найти практически невозможно.

Известны приближенные методы решения

нелинейных уравнений акустической физики [2], основанные на разложении искомой функции в ряд Тейлора по координате – эволюционной переменной – и приближенном суммировании членов этого ряда во всех порядках, вплоть до бесконечного. Полностью просуммировать этот ряд удается лишь в частных случаях, например, для простой волны. Однако, применение данной техники требует «ручного» вмешательства, а именно, использования топологических диаграмм Фейнмана, обеспечивающих наглядное представление внутренней структуры приближающего ряда. Данное обстоятельство сужает применимость спектральных методов случаями не оперативного (of line) использования, например, для предварительных расчетов процессов и конструкций.

В настоящей работе для решения нелинейных уравнений при измерении дальности был применен метод Ньютона, дополненный предварительным моделированием процессов сходимости и возможным расположением экстремальных значений в полосе рабочих частот и граничных условий.

Метод Ньютона, предполагает, что уравнение задано в виде $f(x) = 0$. Предполагается, что в качестве начального значения задано некоторое приближение корня $x^{(0)}$. Данный метод требует вычисления производной первого порядка и является методом первого порядка, так как порядок метода определяется порядком производных, которые используются в методе.

В некоторых, достаточно редких случаях, когда функции заданы аналитически, можно записать формулу для вычисления производной и оформить ее в виде отдельной функции, которая будет вызываться по мере надобности. Однако чаще это невозможно. Тогда прибегают к численному расчету производных, основанному на конечных разностях. В этом случае, чтобы рассчитать производную $f\,'(x)$ в некоторой точке $x$, вычисляют функцию в точке $x + dx$, где $dx$ – некоторое достаточно малое приращение, и считают производную равной

$$f\,x) = [f(x + dx) - f(x)] / dx. \qquad (1)$$

Обозначим как $x^{(k)}$ приближение корня, полученное на $k$ -ой итерации. Тогда на следующей $k + 1$ -ой итерации строится линейная аппроксимация $f_a(x)$ функции вида

$$f\,(x) = f(x^{(k)}) + f\,'\,(x^{(k)}) * (x - x^{(k)}) \qquad (2)$$

и определяется значение

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta\,, \qquad (3)$$

где $\Delta$ – поправка Ньютона, определяемая соотношением

$$\Delta = - f(x(k)) / f\,'\,(x(k)). \qquad (4)$$

К сожалению, метод Ньютона сходится не всегда. Потому применен модифицированный метод Ньютона, надежность которого выше.

Модификация метода заключается в следующем. В основное соотношение метода (3) вводят дополнительный параметр $t$:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + t*\Delta_t\,, \qquad (5)$$

где поправка Ньютона Δ по-прежнему определяется соотношением (4).

Параметр $t$, как будет видно далее, лежит в пределах $0 < t \leq 1$. Таким образом, при $t = 1$ получается классический метод Ньютона. А при $t < 1$ решение сдвигается не на полную поправку Ньютона, а на некоторую ее часть.

Для того, чтобы организовать выбор параметра $t$, отслеживается поведение невязки на двух последовательных итерациях. Структура алгоритма модифицированного метода Ньютона на некоторой $k + 1$ -ой итерации показана на рис. 1.

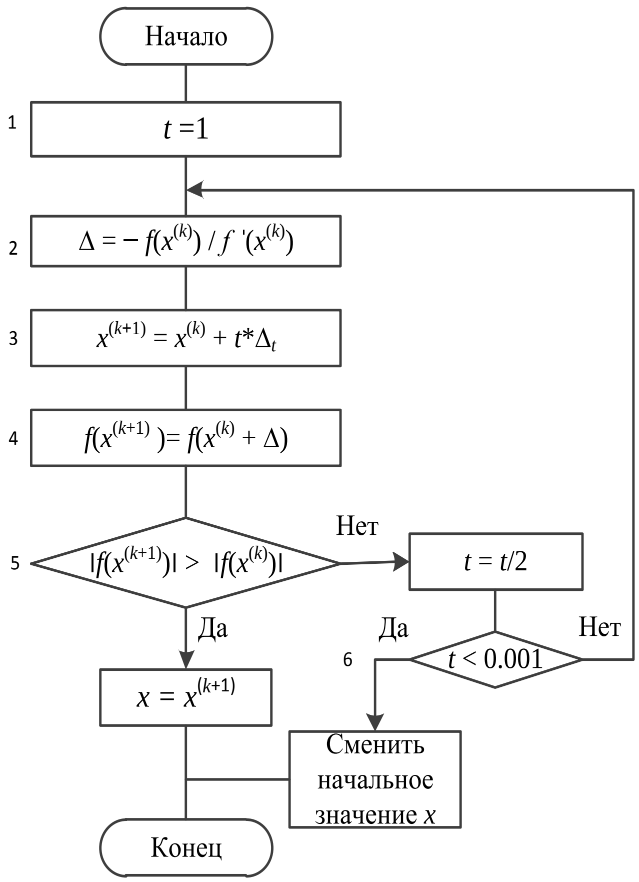


РИС. 1. Структура алгоритма модифицированного метода Ньютона на $k + 1$ -ой итерации

Алгоритм на некоторой $k + 1$ -ой итерации работает следующим образом:

Шаг 1. $t = 1$.

Шаг 2. Вычисляется по соотношению (4) поправка Ньютона Δ.

Шаг 3. Рассчитывается по соотношению (5) значение $x^{(k+1)}$.

Шаг 4. Рассчитывается невязка – значение $f(x^{(k+1)})$.

Шаг 5. Модуль текущей невязки $|f(x^{(k+1)})|$ сравнивается с модулем невязки на предыдущей итерации $|f(x^{(k)})|$. Если $|f(x^{(k+1)})| > |f(x^{(k)})|$, значит, метод начинает расходиться. Тогда параметр $t$ уменьшается (например, в 2 раза) и происходит возврат на шаг 3.

Шаг 6. Проверяются критерии окончания. Если они выполнены, то расчет завершается. В противном случае переходом на шаг 1 начинается следующая итерация.

Как видно из приведенного алгоритма, если невязка все время уменьшается, то параметр $t$ всегда равен 1 и алгоритм работает как обычный метод Ньютона. Но если невязка возросла, то повторяются шаги 3 – 5 с все уменьшающимся параметром $t$, пока невязка на данной итерации не станет меньше или хотя бы равной невязке предыдущей итерации. Таким образом, данный метод не может расходиться, так как невязка просто не может увеличиваться от итерации к итерации.

Повторение шагов 3 – 5 при возникновении опасности расходимости – не слишком трудоемкий процесс. Он не связан с вычислением поправки Ньютона $\Delta$ и, значит, не требует расчета производной. Однако теоретически цикл по шагам 3 – 5 может оказаться бесконечным (правда, это экзотический случай). Подобная опасность связана с таким уменьшением параметра $t$, что второе слагаемое в выражении (2) станет пренебрежимо маленьким, а невязка за счет ошибок округления все-таки будет превышать невязку предыдущей итерации. Если учитывать подобную ситуацию, то надо ограничить минимальное значение параметра $t$. Если $t$ станет меньше некоторого предельного значения, следует прервать расчет, из-за отсутствия сходимости.

Отсутствие расходимости модифицированного метода Ньютона, к сожалению, еще не означает гарантированной сходимости. Метод может сходиться не к корню, а какому-то локальному минимуму функции $f(x)$. Возможно также бесконечное зацикливание – перемещение между несколькими точками, имеющими одинаковые значения невязок. Но все это случается крайне редко. В целом модифицированный метод Ньютона, пожалуй, наиболее надежный метод [3].

В нашем случае модифицированный метод Ньютона программно реализован для решения уравнений (неравенств) дальности обнаружения в режиме шумопеленгования в системе гидроакустических расчетов [4].

В однородной среде зависимость убывания интенсивности сигнала в точке приема для пассивных средств имеет следующий вид:

$$I_o = \frac{I_u}{r^2} * 10^{-0,1*\beta*r}, \qquad (6)$$

где $I_o$– интенсивность сигнала в точке приема; $I_u$ – интенсивность сигнала в точке излучения; $r$ – дальность обнаружения; $\beta$ – коэффициент затухания (поглощения) [5].

Но учитывая неоднородность среды, наличие помех, аномалии распространения шумов формула (6) не подходит для практического расчета дальности.

С учетом параметров, которые влияют на фактические значения дальности обнаружения цели, рассмотрим упрощенные выражения (7) – (10) (описания повторяющихся переменных в этих выражениях имеют один и тот же смысл).

Расчет дальности обнаружения цели по дискретной составляющей в области инфразвуковых частот, отражающей нелинейный характер функциональных зависимостей входящих переменных. В предположении цилиндрического закона спадания интенсивности шумового сигнала с расстоянием имеем:

$$(q_n)^2 < (\frac{P}{R})^2 * 10^{(-0{,}1*\beta*r)}, \tag{7}$$

где $q_n$ – пороговое отношение сигнал/помеха; $R = f(r, r0)$ – расстояние до цели с учетом расстояния спадания звуковой энергии $r0$, $P$ – совокупное влияние помех от технологических конструкций и окружающей среды; β – обобщенный коэффициент километрического затухания; $r$ – искомая дальность обнаружения.

Расчет дальности обнаружения по дискретной составляющей в звуковом диапазоне частот в предположении сферического закона спадания интенсивности сигнала с расстоянием:

$$(q_n)^2 < (\frac{P*A}{r})^2 * 10^{(-0{,}1*\beta*r)}, \tag{8}$$

где $A=F(r)$ – аномалия распространения.

Расчет дальности обнаружения в звуковом диапазоне частот по сплошной части спектра шумоизлучения в предположении согласованной фильтрации в приемном тракте:

$$q_n{}^2 < \sum_{i=1}^{M} (\frac{P*A}{r})^2 * 10^{(-0{,}1*\beta(f_i)*r)}, \tag{9}$$

где $M$ – общее число отсчетов в полосе частот $Df$; $\beta(f_i)$ – массив коэффициентов затухания в диапазоне частот.

Расчет дальности обнаружения в звуковом диапазоне частот по сплошной части спектра шумоизлучения в предположении, что в тракте обработки не учитывается форма спектра сигнала и помех:

$$q_n{}^2 < \left(\frac{1/Df_r * \sum_{i=1}^{M} (P(f_i) * A^2 * f_i)^2 * 10^{(-0{,}1*\beta(f_i)*r)}}{\sqrt{1/Df_r * \sum_{i=1}^{M} P(f_i)^4 * Df_i}}\right), \tag{10}$$

где $P(f_i)$ – массив уровней помех в полосе $Df_r$; $f_i$ – $i$-я частота диапазона частот; $Df_r$ – полоса частот.

Для применения модифицированного метода Ньютона рассматривают разность левой и правой частей неравенств, получают неравенство вида $f(r) < 0$, решение которого сводится к решению уравнения $f(r) = 0$.

Дальность обнаружения, при которой неравенства становятся равенствами, принимается за максимальную ожидаемую дальность обнаружения. Именно на этом удалении в данной (рассматриваемой) водной среде возможно обнаружение цели.

Программа, реализующая решение уравнений дальности, имеет удобный интерфейс, который позволяет ввести значения параметров для каждого из уравнений в широком диапазоне форматов. В основном меню системы гидроакустических расчетов необходимо выбрать пункт ШУМОПЕЛЕНГОВАНИЕ, что позволит выйти на страницу с закладками. Каждая из закладок имеет название типа уравнения дальности. Выбор определенной закладки покажет страницу с самим уравнением и полями для ввода значений параметров данного уравнения. Имеется возможность заполнить параметры значениями в тестовом режиме «?». После ввода значений параметров необходимо нажать кнопку «Расчет», чтобы получить значение дальности обнаружения в соответствующем поле.

Следует отметить, что приведенные неравенства разработаны эмпирическим путем и базируются на уравнении гидроакустики, которое связывает технические характеристики гидроакустической аппаратуры, параметры шумящего объекта взаимодействия, характер его расположения относительно приемной антенны и границ среды, особенности распространения сигналов и шумов в водной среде.

**Выводы.** Предложенный метод решения уравнений дальности для обнаружения целей в водной среде с помощью гидроакустических станций в режиме шумопеленгования может быть рекомендован в системах гидроакустических расчетов.

1. *Гончар А.І.* Концепція розвитку гідроакустики в Україні // Гідроакустичний журнал. Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану. – 2006. – № 3. – С. 5 – 16.
2. *Кузнецов В.П.* О спектральных методах решения уравнений нелинейной акустики // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, № 3. – С. 322 – 326.
3. *Архангельский А.Я.* Приемы программирования в Delphi. Версии 5 – 7, изд. Бином, 2003. – 1152 с.
4. *Проненко М.И., Самолюк Т.А.* Интегрированная программная среда обработки данных (ИПСОД) гидроакустических систем // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2013. – № 12. – С. 123 – 130.
5. *Матвиенко В.Н. Тарасюк Ю.Ф.* Дальность действия гидроакустических средств. – Л.: Судостроение, 1981. – 208 с.

Получено 09.09.2014