А.Л. Вировлянский**ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ
ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ В ПОДВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ***Институт прикладной физики РАН**Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46**Тел.: (831) 416-4784; E-mail: viro@appl.sci-nnov.ru*

Рассматривается регистрация поля тонального точечного источника в подводном звуковом канале (ПЗК) с помощью вертикальной приемной решетки. В свободном пространстве для выделения сигналов, приходящих с разных направлений, формируются лепестки диаграммы направленности антенны. В докладе обсуждаются аналоги этой процедуры для применения в ПЗК. Одним из них является традиционный метод согласованной с полем обработки сигналов, который в англоязычной литературе называется *matched field processing* (MFP). В качестве альтернативы MFP предложен подход, базирующийся на выделении компонент поля, устойчивых к крупномасштабным вариациям скорости звука. Такие компоненты формируются узкими пучками лучей, приходящими на апертуру антенны по разным путям. Показано, что новый подход менее, чем MFP, чувствителен к неизбежным неточностям математической модели среды. Ожидается, что он может быть применен для создания робастных алгоритмов решения обратных задач гидроакустики, связанных с локализацией источника и реконструкцией параметров среды.

Ключевые слова: обратная задача гидроакустики, точечный тональный источник

Рассмотрим ситуацию, когда поле точечного тонального источника, расположенного в точке $\mathbf{r}_s$, регистрируется вертикальной антенной решеткой. Вектор комплексных амплитуд сигналов на элементах решетки обозначим $\mathbf{v}$ и назовем его сигнальным вектором. Будем сравнивать его с сигнальными векторами $\mathbf{u}(\mathbf{r}_0)$, рассчитанными с использованием имеющейся модели среды для разных точек размещения источника $\mathbf{r}_0$ при фиксированном положении антенны. Нормируем сравниваемые векторы условием $|\mathbf{v}| = |\mathbf{u}(\mathbf{r}_0)| = 1$. В классическом методе MFP близость $\mathbf{v}$ и $\mathbf{u}(\mathbf{r}_0)$ количественно характеризуется их скалярным произведением

$|\mathbf{u}^H(\mathbf{r}_0)\mathbf{v}|$, где H обозначает эрмитово сопряжение [1, 2]. Коэффициент:

$$p(\mathbf{r}_0) = \left| \mathbf{u}^H(\mathbf{r}_0)\mathbf{v} \right|^2 = \mathbf{v}^H \mathbf{P}(\mathbf{r}_0) \mathbf{v}, \quad (1)$$

где $\mathbf{P}(\mathbf{r}_0) = \mathbf{u}(\mathbf{r}_0)\mathbf{u}^H(\mathbf{r}_0)$ – проекционная матрица, можно рассматривать как выходной сигнал антенной решетки, настроенной на прием поля, излученного из точки $\mathbf{r}_0$. В свободном пространстве $\mathbf{v}$ и $\mathbf{u}(\mathbf{r}_0)$ представляют приходы плоских волн, а $p(\mathbf{r}_0)$ – мощность сигнала с лепестка диаграммы направленности антенны, нацеленного на точку $\mathbf{r}_0$.

Функция $p(\mathbf{r}_0)$ используется при решении задачи локализации источника в ПЗК, то есть задачи отыскания точки $\mathbf{r}_s$. В качестве оценки $\mathbf{r}_s$ принимается $\mathbf{r}_0$, отвечающее максимуму $p(\mathbf{r}_0)$.

На практике данный подход имеет весьма ограниченную область применимости. Дело в том, что в условиях многолучевости даже небольшое рассогласование между реальным ПЗК и его математической моделью служит причиной значительных ошибок при расчете сигнального вектора.

Рис. 1. Слева: невозмущенный (сплошная линия) и возмущенный (пунктир) профили скорости звука. Справа: три пучка лучей, попадающих на антенну.

В качестве примера рассмотрим глубоководный волновод с профилем скорости звука, показанным в левой части рис. 1 сплошной линией. Поле источника, расположенного на глубине 0.7 км, регистрируется на дистанции 30 км вертикальной решеткой, перекрывающей интервал глубин от 0.75 до 1 км. В правой части рис. 1 показаны три пучка лучей, распространяющихся без отражения от сильно поглощающего дна и попадающих на апертуру антенны. Отклонение реального распределения поля скорости звука в ПЗК от его математической модели будем рассматривать как крупномасштабное (по сравнению с длиной волн)

возмущение. Лучи из одного и то же пучка имеют близкие траектории. Поэтому в присутствии возмущения они пересекают примерно одни и те же неоднородности и приобретают почти одинаковые дополнительные набеги фаз φ . Набег фазы, приобретаемый лучами n -го пучка, обозначим φ_n , $n = 1, 2, 3$. Поскольку разные пучки пересекают разные неоднородности, значения φ_1 , φ_2 и φ_3 независимы.

В невозмущенном ПЗК, когда модель среды идеально точна, сигнальный вектор можно представить в виде $\mathbf{v} = \sum_{n=1}^3 \mathbf{u}_n$, где $\mathbf{u}_n$, $n = 1, 2, 3$ – вклады отдельных пучков. В соответствии с вышесказанным, в присутствии возмущения сигнальный вектор можно представить в виде другой линейной комбинации тех же векторов $\mathbf{u}_n$ [3]:

$$\mathbf{v} = \sum_{n=1}^3 \gamma_n \mathbf{u}_n, \quad (2)$$

где $\gamma_n = \exp(i\varphi_n)$ – неизвестные фазовые множители. Поскольку даже слабое возмущение среды может вызвать набеги фаз φ_n сравнимые с π , реальный сигнальный вектор может кардинально отличаться от результата его расчета в невозмущенном волноводе.

Векторы $\mathbf{u}_n$ представляют компоненты поля, которые в работе [3] названы устойчивыми. Их устойчивость проявляется в том, что в присутствии возмущения каждая из них приобретает лишь независимый от глубины фазовый множитель. В [3] предложен метод выделения данных компонент из суммарного поля, базирующийся на применении заимствованного из квантовой механики разложения поля по когерентным состояниям.

Согласно (2) вектор $\mathbf{v}$ является элементом векторного пространства Γ , базисом которого служат векторы $\mathbf{u}_n$. Введем матрицу $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3]$, столбцами которой служат эти векторы и воспользуемся ее сингулярным разложением $\mathbf{U} = \sum_{n=1}^3 \lambda_n \boldsymbol{\xi}_n \boldsymbol{\eta}_n^H$, где λ_n – сингулярные числа, а $\boldsymbol{\xi}_n$ и $\boldsymbol{\eta}_n$ – сингулярные векторы. Векторы $\mathbf{u}_n$, а вместе с ними λ_n , $\boldsymbol{\xi}_n$ и $\boldsymbol{\eta}_n$, являются функциями $\mathbf{r}_0$. Проекция сигнального вектора $\mathbf{v}$ на пространство Γ равна $\mathbf{Q}(\mathbf{r}_0)\mathbf{v}$, где $\mathbf{Q}(\mathbf{r}_0) = \sum_{n=1}^3 \boldsymbol{\xi}_n(\mathbf{r}_0) \boldsymbol{\xi}_n^H(\mathbf{r}_0)$. Если $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_s$ и вектор $\mathbf{v}$ с хорошей точностью может быть представлен в виде разложения (2), то его проекция примерно совпадает с самим вектором, то есть $\mathbf{Q}(\mathbf{r}_0)\mathbf{v} \approx \mathbf{v}$. Исходя из этого, в качестве выходного сигнала антенны вместо $p(\mathbf{r}_0)$, примем:

$$q(\mathbf{r}_0) = \mathbf{v}^H \mathbf{Q}(\mathbf{r}_0) \mathbf{v}. \quad (3)$$

Как и $p(\mathbf{r}_0)$, функция $q(\mathbf{r}_0)$ принимает значения в интервале $[0,1]$ и должна иметь максимум при $\mathbf{r}_0$ близком к истинному положению источника.

Принципиально важный момент заключается в том, что функция $q(\mathbf{r}_0)$ фактически представляет собой результат некогерентного суммирования устойчивых компонент поля и поэтому она менее чувствительна к неточностям модели среды, чем $p(\mathbf{r}_0)$. При настройке антенны на прием сигналов, излученных из точки $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_s$, следует ожидать, что сигнал на выходе процессора (3), равный $q(\mathbf{r}_s)$, должен, как правило, превышать сигнал $p(\mathbf{r}_s)$ на выходе процессора (1). Это подтверждается приведенными на рис. 2 результатами вычисления значений $p(\mathbf{r}_s)$ и $q(\mathbf{r}_s)$ для ситуации, когда источник и антенна расположены как показано на рис. 1. Проекционные матрицы $\mathbf{P}(\mathbf{r}_0)$ и $\mathbf{Q}(\mathbf{r}_0)$ рассчитаны в невозмущенном плоскостойком волноводе с профилем скорости звука, изображенном сплошной линией. «Измеренное» поле $\mathbf{v}$ рассчитано в возмущенном («реальном») волноводе с опорным профилем скорости звука, изображенном пунктирной линией, и случайными флуктуациями скорости звука со среднеквадратичной амплитудой 0.25 м/с и характерными вертикальным и горизонтальным масштабами равными 0.5 км и 5 км соответственно. Как видим, для всех рассмотренных 40 реализаций случайного возмущения $q(\mathbf{r}_s) > p(\mathbf{r}_s)$.

Рис. 2. Величины коэффициентов p (звездочки) и q (кружки), рассчитанные для 40 реализаций случайного возмущения скорости звука.

Переход от $p(\mathbf{r}_s)$ к $q(\mathbf{r}_s)$ является основным результатом данной работы. Такая модификация делает метод MFP более робастным и расширяет область его применимости.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 5 «Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов».

Литература

1. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. An overview of matched field methods in ocean acoustics // J. Ocean. Eng. 1993. Vol. 18. No. 4. P. 401–424.
2. Tolstoy A. Review of matched field processing for environmental inverse problems // International journal of modern physics. 1992. Vol. 3. No. 4. P. 691–708.
3. Virovlyansky A.L. Stable components of sound fields in the ocean // J. Acoust. Soc. Am. 2017. Vol. 141. No. 2. P. 1180–1189.

A.L. Virovlyansky

RECEIVE BEAMFORMING IN AN UNDERWATER WAVEGUIDE

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
46 Ul'yanov Street , 603950, Nizhny Novgorod , Russia
Tel.: (831) 416-4784; E-mail: viro@appl.sci-nnov.ru*

The registration of the wavefield excited by a CW point source in an underwater sound channel (USC) using a vertical receiving array is considered. In the free space to isolate signals coming from different directions, the lobes of the antenna pattern are formed. The report discusses the analogues of this procedure for use in USC. One of them is the traditional method of matched field processing (MFP). As an alternative to MFP, an approach based on the isolation of field components stable to large-scale variations in the sound speed is proposed. Such components are formed by narrow beams of rays that arrive at the antenna aperture via different paths. It is shown that the new approach is less than MFP sensitive to the inevitable inaccuracies of the environmental model. It is expected that it can be used to create robust algorithms for solving inverse problems of hydroacoustics associated with source localization and reconstruction of environmental parameters.

Keywords: inverse hydroacoustics problem, point tonal source

Acknowledgment: This work was supported by the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 5 «Photonic technologies in sensing inhomogeneous media and biological objects».

References

1. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., and Mikhalevsky P.N. An overview of matched field methods in ocean acoustics. J. Ocean. Eng., 1993, Vol. 18, No. 4, pp. 401–424.
2. Tolstoy A. Review of matched field processing for environmental inverse problems. International journal of modern physics, 1992, Vol. 3, No. 4, pp. 691–708.
3. Virovlyansky A.L. Stable components of sound fields in the ocean. J. Acoust. Soc. Am., 2017, Vol. 141, No. 2, pp. 1180–1189.