

## Локализация источника в случайно–неоднородном океаническом волноводе с неизвестными параметрами с использованием адаптивного обобщенного алгоритма MUSIC

А. Г. Сазонтов,\* И. П. Смирнов†

Институт прикладной физики РАН. Россия, 603195, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46  
(Статья поступила 28.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Построен робастный алгоритм MUSIC, позволяющий локализовать акустический источник в условиях неполной информации о случайном канале распространения. В предположении, что основным механизмом, вызывающим рассеяние звука, является развитое ветровое волнение, представлены результаты статистического моделирования и экспериментальной апробации предложенного метода, характеризующие его работоспособность в реальной мелководной акватории.

PACS: 43.30.+m. УДК: 681.7:534.91

Ключевые слова: неточное знание случайного канала распространения, локализация источника, обобщенный алгоритм MUSIC, рассеяние на взволнованной поверхности, статистическое моделирование, экспериментальная апробация.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в общей теории адаптивных АР интенсивно развивается научное направление, связанное с построением робастных алгоритмов локализации источника в случайно–неоднородной среде, учитывающих отличие ожидаемой сигнальной матрицы от истинной. Такой подход рассчитан на наихудший сценарий приема; он предполагает ограниченность по норме матрицы ошибок, при этом адаптация к условиям априорной неопределенности заключается в нахождении устойчивой процедуры оценивания, позволяющей частично скомпенсировать эффекты статистического несоответствия (см. обзор [1] и цитируемую там литературу).

В настоящей работе в рамках наихудшего сценария построен обобщенный робастный алгоритм MUSIC, предназначенный для локализации источника условиях неполной информации о случайном канале распространения. Представлены результаты моделирования и экспериментальной апробации предложенного метода, иллюстрирующие его эффективность.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Пусть в точке с координатами  $\theta = (r_0, z_0)^T$  акустического волновода расположен узкополосный источник звука, излучающий шумовой сигнал с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma_s^2$ . (Верхний индекс  $T$  обозначает операцию транспонирования.) Прием осуществляется вертикальной АР, состоящей из  $N$  элементов, расположенных на горизон-

тах  $\{z_j\}_{j=1}^N$ . (Начало координат по дальности выбрано в месте установки АР.)

В случайно–неоднородном канале корреляционная матрица вектора наблюдения на входе АР может быть записана в виде

$$\mathbf{\Gamma}_x = \sigma_s^2 \mathbf{R}_s + \mathbf{\Gamma}_n, \quad \text{rank}(\mathbf{R}_s) > 1.$$

Здесь  $\mathbf{R}_s$  — сигнальная матрица, удовлетворяющая условию нормировки  $\text{Tr}(\mathbf{R}_s) = 1$ , где  $\text{Tr}(\cdot)$  означает след матрицы, а  $\mathbf{\Gamma}_n$  — корреляционная матрица аддитивного шума. В реальных условиях истинная матрица  $\mathbf{\Gamma}_x$  неизвестна и вместо нее используется выборочная матрица  $\hat{\mathbf{\Gamma}}_x$ .

Многие методы оценивания параметров гидроакустических сигналов основаны на спектральном разложении  $\hat{\mathbf{\Gamma}}_x$ :

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_x = \hat{\mathbf{U}}_s \hat{\mathbf{\Lambda}}_s \hat{\mathbf{U}}_s^+ + \hat{\mathbf{U}}_n \hat{\mathbf{\Lambda}}_n \hat{\mathbf{U}}_n^+.$$

Здесь  $\hat{\mathbf{U}}_s$  — матрица размерности  $N \times J$ , составленная из  $J$  старших собственных векторов  $\hat{\mathbf{\Gamma}}_x$ , формирующих сигнальное подпространство,  $\hat{\mathbf{U}}_n$  — матрица  $N \times (N - J)$ , столбцами которой являются собственные векторы, отвечающие минимальным собственным числам, а  $\hat{\mathbf{\Lambda}}_s$  и  $\hat{\mathbf{\Lambda}}_n$  — диагональные матрицы соответствующих собственных значений. (Символ  $(\cdot)^+$  означает операцию эрмитового сопряжения.)

Одним из наиболее распространенных проекционных методов оценивания параметров частично–когерентного сигнала является обобщенный алгоритм MUSIC согласно которому искомые координаты источника могут быть найдены из условия [2]:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} P_{\text{GMUSIC}}(\theta), \quad (1)$$

$$P_{\text{GMUSIC}}(\theta) = 1 / \text{Tr}\{\hat{\mathbf{\Pi}}_n \mathbf{R}_s(\theta)\},$$

где  $\hat{\mathbf{\Pi}}_n = \hat{\mathbf{U}}_n \hat{\mathbf{U}}_n^+$ . При практической реализации этого метода в качестве матрицы  $\mathbf{R}_s(\theta)$  (вследствие непол-

\*E-mail: sazontov@ipfran.ru

†E-mail: ismirnov@gmail.com

ной информации о канале распространения) используется некоторая оценочная матрица  $\mathbf{R}_s^{(0)}(\theta)$ , рассчитываемая для номинальных акустических характеристик волновода. При наличии рассогласования между соответствующими матрицами указанный способ оценивания нуждается в уточнении.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОЙ СИГНАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ

При построении адаптивной процедуры GMUSIC, основанной на наихудшем сценарии приема, удобно представить эрмитову матрицу  $\mathbf{R}_s^{(0)}(\theta)$  в виде  $\mathbf{R}_s^{(0)} = \mathbf{D}_0(\theta)\mathbf{D}_0^+(\theta)$  и предположить, что истинная матрица  $\mathbf{D}(\theta)$  отличается от  $\mathbf{D}_0(\theta)$  некоторой ошибкой, норма Фробениуса которой ограничена заданной величиной:  $\|\mathbf{D}(\theta) - \mathbf{D}_0(\theta)\|_F^2 \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — положительный параметр регуляризации. Адаптация к условиям априорной неопределенности состоит в нахождении робастной сигнальной матрицы  $\mathbf{D}(\theta, \varepsilon)$ , удовлетворяющей указанному ограничению, условию нормировки  $\|\mathbf{D}(\theta, \varepsilon)\|_F^2 = 1$  и обеспечивающей максимум выходной мощности (1):

$$\min_{\mathbf{D}} \text{Tr}\{\mathbf{D}^+ \hat{\mathbf{\Pi}}_n \mathbf{D}\} \text{ при } \|\mathbf{D} - \mathbf{D}_0\|_F^2 \leq \varepsilon, \quad (2)$$

$$\|\mathbf{D}\|_F^2 = 1.$$

Решение оптимизационной задачи (2) может быть найдено с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа. Знание  $\mathbf{D}(\theta, \varepsilon)$  позволяет рассчитать адаптивную целевую функцию  $V(\theta, \varepsilon) = \text{Tr}[\mathbf{D}^+(\theta, \varepsilon)\hat{\mathbf{\Pi}}_n\mathbf{D}(\theta, \varepsilon)]$  и в итоге оценить искомые координаты источника из условия максимума выходной мощности  $P_{\text{GMUSIC}}(\theta, \varepsilon) = 1/V(\theta, \varepsilon)$  или эквивалентного критерия

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} V(\theta, \varepsilon) \equiv f^2(\theta, \varepsilon)V_0(\theta), \quad (3)$$

где

$$f(\theta, \varepsilon) = 1 - \varepsilon + \sqrt{\varepsilon(1 - \varepsilon/4)[1 - V_0(\theta)]},$$

$$\text{при } 0 \leq \varepsilon < \varepsilon(\theta),$$

и

$$f(\theta, \varepsilon) = 0, \quad \text{при } \varepsilon(\theta) \leq \varepsilon < 2,$$

$$\varepsilon(\theta) = 2[1 - \sqrt{1 - V_0(\theta)}],$$

а  $V_0(\theta) = \text{Tr}[\mathbf{D}_0^+(\theta)\hat{\mathbf{\Pi}}_n\mathbf{D}_0(\theta)]$  — целевая функция традиционного алгоритма (1). При  $\varepsilon = 0$ ,  $f(\theta, \varepsilon) = 1$  и следовательно, стандартный метод (1) является частным случаем предложенного способа оценивания.

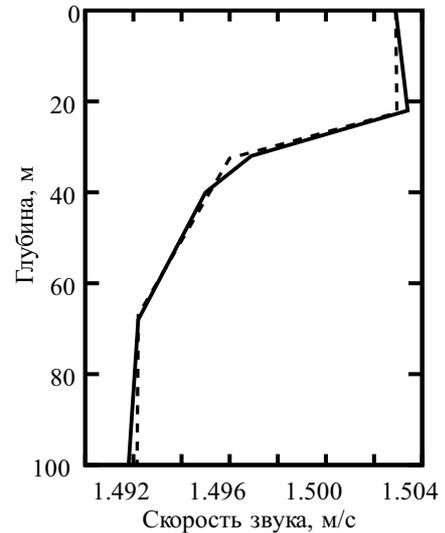


Рис. 1: Профили скорости звука

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведем результаты статистического моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенного алгоритма (3) и сравним его эффективность с неадаптивным методом (1). В качестве примера рассмотрим мелководную акваторию, в которой основным источником флуктуаций акустического поля является развитие ветровое волнение, описываемого моделью спектра Пирсона–Московитца. Для такого сценария расчетные соотношения для ожидаемой матрицы  $\mathbf{R}_s^{(0)}(\theta)$  (в приближении малых значений параметра Рэлея) приведены в работе [3].

Профиль скорости звука в исследуемом регионе показан на рис. 1 сплошной линией (пунктиром изображен профиль, используемый в процессе локализации). Предполагается, что звуковое поле создается источником с несущей частотой 250 Гц, расположенным на глубине 70 м и удаленным от антенны на расстояние 15 км. Прием осуществлялся 16-ти элементной эквидистантной (с шагом 3 м) вертикальной АР с центром на глубине 50 м. В рамках численного эксперимента скорость ветра  $v$  бралась равной 10 м/с; дно моделировалось жидким поглощающим полупространством с плотностью  $\rho_b = 2 \text{ г/см}^3$ , скоростью звука  $c_b = 1750 \text{ м/с}$  и коэффициентом поглощения  $\alpha = 0.13 \text{ дБ/л}$ , а при расчете ожидаемой матрицы  $\mathbf{R}_s^{(0)}(\theta)$   $v$  составляла 12 м/с, при этом в качестве номинальных геоакустических параметров дна использовались значения  $\rho_b = 1.85 \text{ г/см}^3$ ,  $c_b = 1700 \text{ м/с}$  и  $\alpha = 0.1 \text{ дБ/л}$ .

На рис. 2,а показана зависимость среднеквадратических ошибок (СКО) оценивания положения источника по дальности (полученная усреднением по 500 независимым экспериментам) от выходного отношения

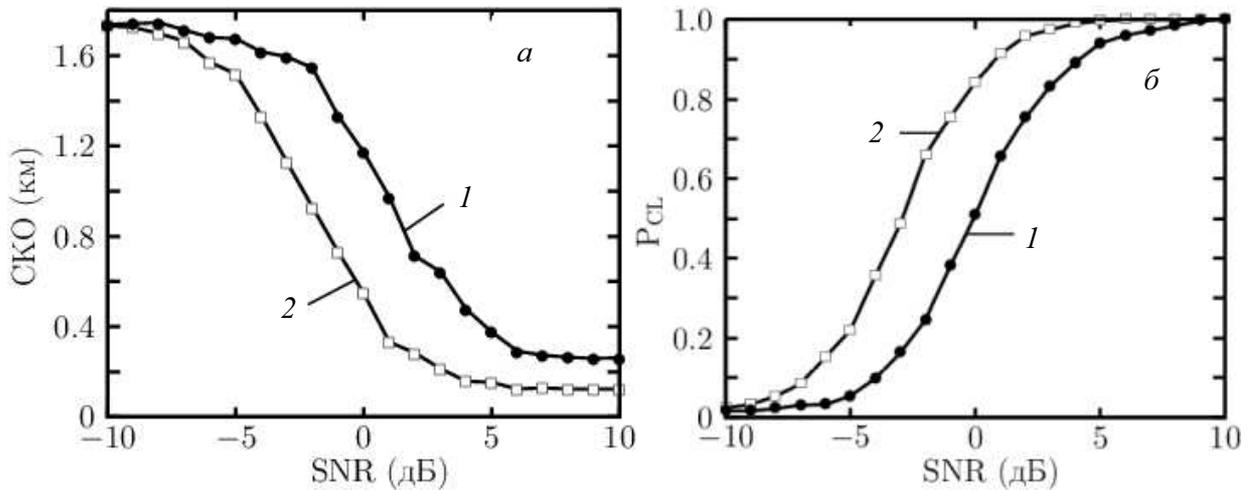


Рис. 2: Зависимость СКО (а) и вероятности правильной локализации (б) от выходного отношения сигнал/шум

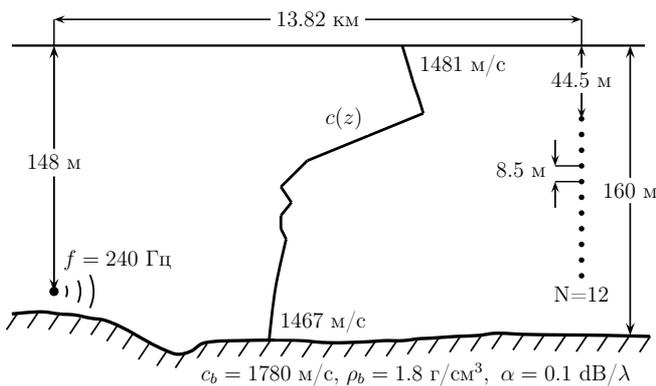


Рис. 3: Геометрия эксперимента

сигнал/шум SNR. Кривая 1 на рис. 2 отвечает традиционному способу (1), а кривые 2 соответствует предложенному робастному алгоритму (3) при  $\epsilon = 0.15$ .

На рис. 2,б для рассматриваемых значений SNR представлены результаты расчета вероятности правильной локализации  $P_{CL}$ , определяемой как доля реализаций, для которых ошибки в определении положения источника по дистанции и глубине не превосходят 400 м и 2 м, соответственно. Видно, что наилучшие потенциальные возможности иллюстрирует предложенный метод (3)

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

Для верификации предложенного метода были использованы экспериментальные данные, полученные в октябре 1990 г. в Баренцевом море. Геометрия эксперимента и номинальные геоакустические параметры волновода показаны на рис. 3. Скорость ветра при нахождении сигнальной оценочной матрицы  $\mathbf{R}_s^{(0)}$  была 7 м/с.

На рис. 4,а изображена нормированная (на максимальное значение) выходная мощность неадаптивного процессора (1) в зависимости от ожидаемого положения источника по дальности и глубине (т. е. с использованием сигнальной матрицы  $\mathbf{R}_s^{(0)}(\theta)$ , рассчитанной для номинальных параметров волновода). Для сравнения на рис. 4,б показано поведение  $P_{GMUSIC}(\theta, \epsilon)$  (при  $\epsilon = 0.15$ ), построенной с привлечением робастного алгоритма (3) позволяющего повысить устойчивость процедуры оценивания. Из приведенных графиков видно, что во всех случаях положение абсолютного максимума наблюдается при  $\hat{r}_0 = 12.45$  км и  $\hat{z}_0 = 148$  м, что довольно близко к истинным значениям координат.

Однако применение неадаптивного способа обработки приводит к появлению достаточно интенсивных ложных пиков, что значительно затрудняет решение задачи локализации источника.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе построен робастный алгоритм MUSIC, позволяющий локализовать источник в условиях неполной информации о случайном канале распространения. Приведены результаты математического моделирования предложенного метода, иллюстрирующие приемлемую точность оценивания координат источника и высокую вероятность его правильной локализации по сравнению с неадаптивным аналогом, предполагающим априорное знание акустических характеристик волновода. Верификация приведенного способа на экспериментальных данных, полученных в Баренцевом море, показала, что в реальных условиях соответствующий алгоритм обеспечивает удовлетворительное качество восстановления источника без использования трудоемкой процедуры одновременного поиска как искомым координат, так и неизвестных параметров волновода. Последнее свидетельствует о перспек-

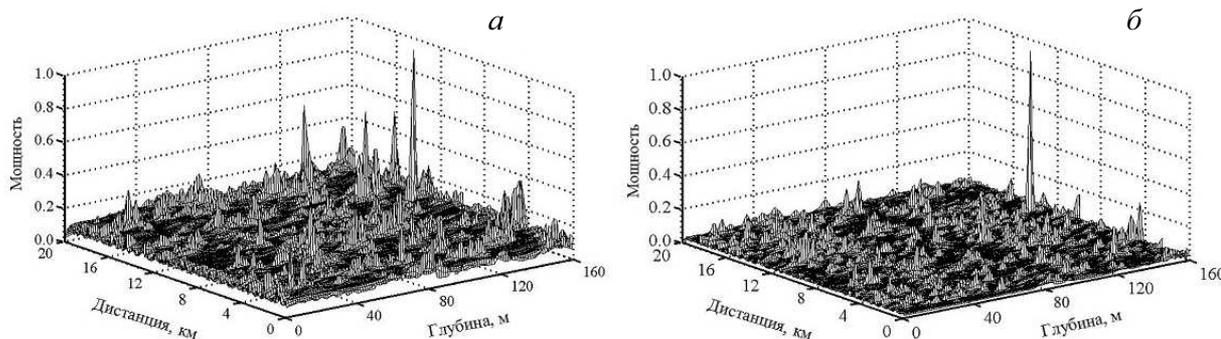


Рис. 4: Выходная мощность неадаптивного (а) и адаптивного (б) процессора GMUSIC.

тивности применения данного метода в практических задачах подводной акустики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-42-02390).

- [1] Сазонтов А. Г., Малеханов А. И. Акуст. журн. 2015. **61**, № 2. С. 233.  
[2] Valaee S., Champagne B., Kabal P. IEEE Trans. on Signal Process. 1995. **43**, № 9. P. 2144.

- [3] Вдовичева Н. К., Матвеев А. Л., Сазонтов А. Г. Акуст. журн. 2002. **48**, № 3. С. 309.

## Source localization in a randomly inhomogeneous oceanic waveguide with unknown parameters using adaptive generalized MUSIC algorithm

A. G. Sazontov<sup>a</sup>, I. P. Smirnov<sup>b</sup>

<sup>1</sup>Federal research center Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950 Russia.

E-mail: <sup>a</sup>sazontov@ipfran.ru, <sup>b</sup>smip@ipfran.ru

A generalized robust MUSIC algorithm is constructed, that allows to localize an acoustic source under the conditions of incomplete information on a random propagation channel. Under the assumption that the main mechanism causing the sound scattering is a fully-developed wind waves, the results of statistical modeling and experimental testing of the proposed method characterizing its performance in real shallow water are presented.

PACS: 43.30.+m.

*Keywords:* imperfect knowledge of a random propagation channel, source localization, generalized MUSIC algorithm, rough surface scattering, statistical modeling, experimental validation.

*Received 28 July 2017.*

### Сведения об авторах

1. Сазонтов Александр Геннадьевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-48, e-mail: sazontov@ipfran.ru.
2. Смирнов Иван Паисьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-29, e-mail: smip@ipfran.ru.