



УДК 621.391, 621.396, 621.369

В. И. Строков, В. А. Пахотин, В. М. Анискевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ**

Применена теория оптимального приема для азимутального разрешения двух источников звукового возмущения. Производится сравнение разрешающей способности решения, основанного на теории максимального правдоподобия, с классическим подходом Релея. Для всестороннего анализа полученных решений создана компьютерная модель и реальная экспериментальная установка. Получаемые модельные и реальные пеленгационные характеристики демонстрируют существенное преимущество решения на основе теории оптимального приема. Работа направлена на исследование возможностей и указание на преимущества названной теории.

69

The article deals with application of the theory of optimum detection to the azimuth resolution of two sound sources. This paper compares the solutions based on maximum likelihood method with the classical approach (Rayleigh's approach). Furthermore, the computer model and the testbench (experimental apparatus) have been created for an extensive analysis of the obtained solution. Our experimental and model results demonstrate a significant advantage of the solution obtained by using the theory of optimum detection. The purpose of this study is present the possibilities and advantages of the maximum likelihood method.

Ключевые слова: теория оптимального приема, метод максимального правдоподобия.

Key words: theory of optimum detection, maximum likelihood method.

Исследование вопросов распространения и приема звуковых и ультразвуковых волн является актуальной областью. Акустические волны характеризуются хорошим отражением от близкорасположенных предметов. В связи с этим поле акустических волн оказывается сложным, состоящим из ряда лучей, отраженных от стен, потолка, пола помещения.

Для выделения определенного луча необходимо использовать узконаправленную антенную систему. Для этой цели отлично подходят фазированные антенные решетки (ФАР). Применение ФАР позволяет избежать механического вращения антенной системы для построения пеленгационной характеристики, изменение же диаграммы направленности достигается путем изменения фазовых соотношений на приеме. В работе применена изготовленная авторами линейная ФАР из восьми однонаправленных электретных микрофонов.

Пространственное сканирование достигается посредством вращения ФАР относительно оси системы. Приведение антенны во вращательное движение осуществляет исполнительный механизм на основе шагового двигателя с системой приводов и электронной схемой управления, которая функционирует по алгоритму, заданному оператором. Структурная схема установки показана на рисунке 1.

Суммарный сигнал на выходе антенной системы представим в следующем виде:



$$\mathcal{E} = \sum_{n=1}^N \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_0 e^{-i\Delta\phi} + \mathcal{E}_0 e^{-2i\Delta\phi} + \dots + \mathcal{E}_0 e^{-(n-1)i\Delta\phi} \quad (1)$$

где ϕ – сдвиг фазы между сигналами на микрофонах, \mathcal{E}_n – комплексные амплитуды принимаемых сигналов.



70

Рис. 1. Структурная схема установки

Выражение (1) является основой для определения диаграммы направленности данной системы, которая может быть выражена так:

$$F^A(\alpha) = F(\alpha) \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} nd \sin(\alpha_0 - \alpha)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\alpha_0 - \alpha)\right)} \right|,$$

где $F(\alpha)$ – диаграмма направленности отдельного микрофона, α – угол, определяющий положение нормали линейки микрофонов. При изменении угла α по заданному закону $\alpha(t) = \Omega_0 t$ получим диаграмму направленности с максимумом в направлении α_0 .

Диаграмма направленности, приведенная на рисунках 2 и 3, рассчитана для следующих параметров:

$$\begin{cases} \alpha_0 = 0; \\ n = 8; \\ d = 0,06\text{ м}; \\ \lambda = 0,068\text{ м}. \end{cases}$$

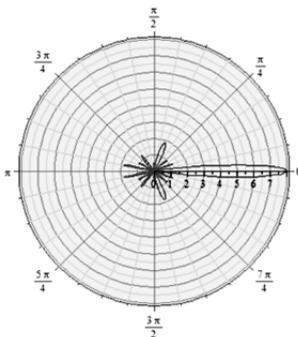


Рис. 2. Диаграмма направленности антенной системы

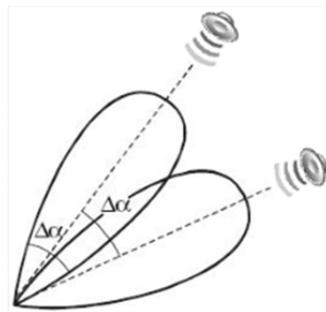


Рис. 3. Пояснение к критерию Релея



Ширину диаграммы направленности (ДН) можно оценить с помощью выражения

$$(2\alpha_0) \approx 115^\circ \frac{\lambda}{L},$$

что в нашем случае она составит:

$$(2\alpha_0) \approx 115^\circ \frac{0,068\text{ м}}{8 \cdot 0,6\text{ м}} \approx 16^\circ.$$

В оптике для разрешения сигналов часто используют критерий Релея. Мы воспользуемся им же для оценки возможностей разрешения целей антенны с шириной диаграммы направленности 2θ по получаемой пеленгационной характеристике. Две цели, разнесенные по азимуту на угол θ , согласно критерию Релея считаются разрешимыми (рис. 4). Они раздельно отображаются на экране локатора. Если их угловое различие меньше, чем θ , тогда цели по азимуту неразрешимы.

71

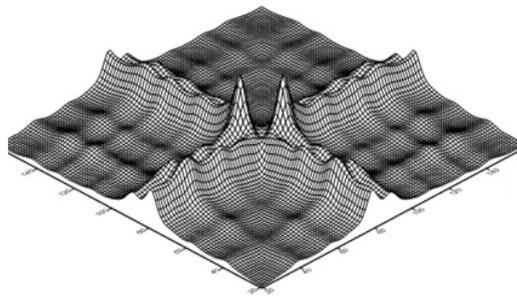


Рис. 4. Примерный вид зависимости величины обратной функционалу правдоподобия от оцениваемых углов расположения источников возмущения α_{01} и α_{02}

Теперь рассмотрим решение задачи разрешения двух звуковых сигналов с помощью такой линейки микрофонов, основанное на применении теории максимального правдоподобия. Для этого запишем принятое сообщение в следующем виде:

$$\mathfrak{F}(\alpha) = \mathfrak{E}_1 \mathfrak{f}_1(\alpha_{01} - \alpha) + \mathfrak{E}_2 \mathfrak{f}_2(\alpha_{02} - \alpha) + \mathfrak{U}_u(\alpha),$$

где \mathfrak{E}_1 и \mathfrak{E}_2 — комплексные амплитуды звуковых волн, а

$$\begin{cases} \mathfrak{f}(\alpha_0 - \alpha) = e^{i\psi(\alpha_0 - \alpha)} \frac{\sin(\frac{\pi}{\lambda} nd \sin(\alpha_0 - \alpha))}{\sin(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\alpha_0 - \alpha))} \\ \psi(\alpha_0 - \alpha) = \frac{\pi(n-1)d \sin(\alpha_0 - \alpha)}{\lambda}, \end{cases}$$

$\mathfrak{U}_u(\alpha)$ — аддитивный шум с нормальным распределением, средним значением равным нулю и дисперсией σ^2 . Шум характеризуется интервалом корреляции τ_k .



Опираясь на положения теории [5], выводим функционал правдоподобия в минимуме которого (или в максимуме обратной величины) получаем оценки направлений прихода сигналов α'_{01} и α'_{02} .

$$\Delta(\alpha'_{01}, \alpha'_{02}) = |\mathcal{E}(\alpha)|^2 - \mathcal{E}'_1 y(\alpha) \mathcal{E}_1(\alpha'_{01} - \alpha) - \mathcal{E}'_2 y(\alpha) \mathcal{E}_2(\alpha'_{02} - \alpha) \quad (7)$$

Пример поверхности такого функционала приведен на рисунке 4.

Для одного источника звуковых возмущений дисперсия определения азимута дается выражением

$$D_\alpha = \frac{\sigma^2 \pi}{|\mathcal{E}_0|^2 N \int_0^\pi \left| \frac{df(\alpha'_0 - \alpha)}{d\alpha'} \right| d\alpha},$$

где N — число некоррелированных отсчетов шума.

Как видим, в случае применения теории оптимального приема дисперсия определяемых параметров, а, следовательно, возможность разрешения сигналов зависит от отношения сигнал/шум. В случае же классического рассмотрения мы ограничены шириной диаграммы направленности. Отсюда вытекает простой вывод: новый метод с применением теории оптимального приема позволяет разрешать классически неразрешимые сигналы.

Приведем пример модельного анализа разрешения двух сигналов, разнесенных по азимуту на угол меньше полуширины диаграммы направленности антенны.

Как показывает рисунок 5, обработка с помощью нового алгоритма позволяет выявить наличие двух целей звукового возмущения (в случае одного источника максимум был бы один, в нашем же случае видно два зеркально-симметричных максимума), в то время как классическая пеленгационная характеристика (рис. 6) дает ложное представление о наличии одной цели.

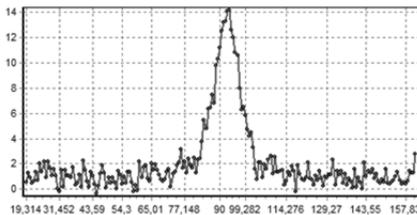


Рис. 5. Классическая пеленгационная характеристика

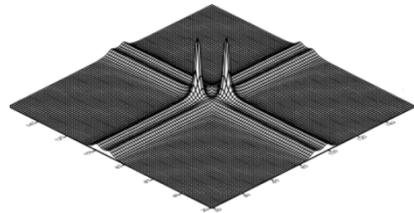


Рис. 6. Трехмерная поверхность величины обратной функционалу правдоподобия

Приведем пример экспериментальных данных, полученных с помощью созданной установки, по разрешению двух сигналов, разнесенных по азимуту на угол 6 градусов (рис. 7). После обработки становится очевидным присутствие двух источников сигнала, на пеленгационной же характеристике есть только один основной максимум и шумовые пики.

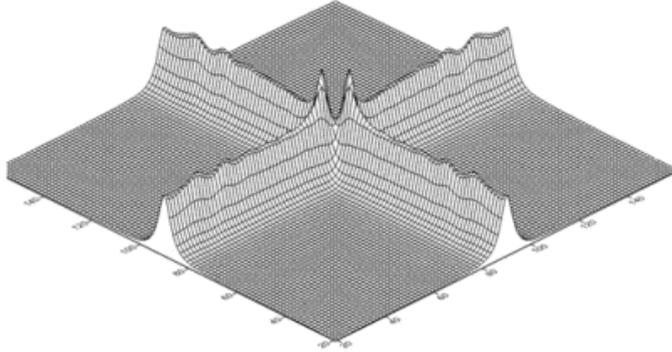


Рис. 7. Трехмерная поверхность величины обратной функционалу правдоподобия

Как модельные, так и экспериментальные данные подтверждают преимущество использования алгоритмов обработки, в основе которых лежит метод максимального правдоподобия.

Список литературы

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. М., 2004.
2. Вахитов Ш. Я., Ковалгин Ю. А. Акустика. М., 2009.
3. Пахотин В. А., Бессонов В. А. Теоретические основы оптимальной обработки сигналов. Калининград, 2008.
4. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособ. для вузов. М., 2003.
5. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М., 1983.
6. Хорев А. А. Направленные микрофоны и лазерные акустические системы разведки // Специальная техника. 2010. №4. С. 2–11.

Об авторах

Виталий Игоревич Строков — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: vistrokov@kantiana.ru

Валерий Анатольевич Пахотин — д-р. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: vpakhotin@kantiana.ru

Вячеслав Михайлович Анискевич — науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: vaniskevich@kantiana.ru

About the authors

Vitaliy Strokov — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: vistrokov@kantiana.ru

Valeriy Pakhotin — Dr, Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: vpakhotin@kantiana.ru

Vyacheslav Aniskevich — Research scientist, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: vaniskevich@kantiana.ru