

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Калин А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Калютчик В.С. – к.т.н.

В статье приводятся результаты сравнительного анализа разрешающей способности методов оценки пространственного спектра акустического сигнала, полученные при помощи разработанной имитационной модели в программе LabVIEW. Сравниваются два класса методов: классический метод задержек и суммирования (Delay-and-Sum) и сверхразрешающие модифицированные методы: Кейпона (Capon), теплового шума (Thermal noise) и многосигнальной классификации (MUSIC).

Методы оценки пространственного спектра сигнала предназначены для определения угловых координат источников излучения, расположенных в дальней зоне относительно антенной решетки. Разрешающая способность классического метода задержек и суммирования ограничена шириной главного лепестка антенной решетки, измеренного по уровню половинной мощности (-3 дБ). В современных условиях цифровая антенная решетка должна обеспечивать высокую разрешающую способность по угловым координатам. Метод Кейпона, метод теплового шума и метод многосигнальной классификации позволяют значительно увеличить разрешающую способность решетки, не меняя ее конфигурации, а только лишь за счет специальной математической обработки [1–3].

Для моделирования использовалась имитационная модель, разработанная в программе LabVIEW. В качестве исходных данных использовались следующие параметры:

$S = 2$  – количество источников сигналов;

$\Delta t = 0,1$  мс – интервал дискретизации сигналов;

$N$  – количество отсчетов сигналов;

$A_{11} = A_{12} = A_{21} = A_{22} = 1$  – амплитуды спектральных составляющих первого и второго источников;

$f_{11} = 1$  кГц,  $f_{12} = 3$  кГц – частоты спектральных составляющих первого источника;

$f_{21} = 1,5$  кГц,  $f_{22} = 2$  кГц – частоты спектральных составляющих второго источника;

$X_{\text{порог}} = 0,01$  – пороговое значение фильтра;

$\beta_1 = \text{var}$  град – угол фронта волны от первого источника относительно нормали к решетке;

$\beta_2 = \text{var}$  град – угол фронта волны от второго источника относительно нормали к решетке;

$M = 10$  – количество элементов антенной решетки;

$d = 0,05$  м – расстояние между соседними каналами решетки;

$d/\lambda_{\text{min}} = 0,441$  – отношение расстояния между каналами решетки к наименьшей длине волны;

$\sigma = 40$  дБ – отношение сигнал/шум в каналах решетки;

$\beta_n = -90$  град – начальный угол сканирования;

$\beta_k = +90$  град – конечный угол сканирования;

$\Delta\beta = 0,1$  град – шаг угла сканирования.

На рисунке 1 показаны графики разрешающих функций, построенных методами Delay-and-Sum, Capon, Thermal noise и MUSIC при различной разности углов между источниками.

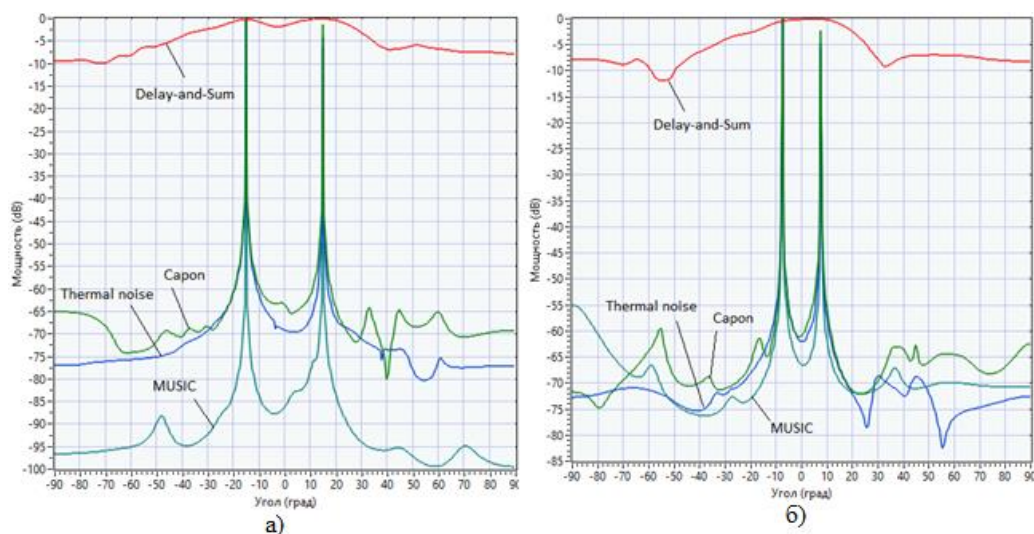


Рисунок 1 – Графики разрешающих функций: разность углов между источниками составляет 30 град – метод Delay-and-Sum дает различные максимумы (а); разность углов между источниками составляет 15 град – метод Delay-and-Sum дает неразличимые максимумы (б)

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики разрешающей способности по угловым координатам классического метода Delay-and-Sum и модифицированных методов Capon, Thermal noise, MUSIC для различных углов прихода фронта волны от первого и второго источников относительно нормали к решетке. К параметрам сравнения относятся: различимость максимумов;  $h$ , дБ – средняя глубина провала между максимумами;  $\delta_{\beta 1}$ , град – среднеквадратическая ошибка определения угловой координаты первого источника;  $\delta_{\beta 2}$ , град – среднеквадратическая ошибка определения угловой координаты второго источника.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики разрешающей способности методов

Параметры	Классический метод задержек и суммирования					
	Разность углов прихода фронта волны от первого и второго источников					
	30 град	20 град	15 град	10 град	5 град	2 град
Различимость максимумов	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
$h$ , дБ	-1,8	-0,7	–	–	–	–
$\delta_{\beta 1}$ , град	0,3	1,5	–	–	–	–
$\delta_{\beta 2}$ , град	0,5	2,5	–	–	–	–
Параметры	Модифицированный метод Кейпона					
	Разность углов прихода фронта волны от первого и второго источников					
	30 град	20 град	15 град	10 град	5 град	2 град
Различимость максимумов	Да	Да	Да	Да	Да	Да
$h$ , дБ	-65,4	-62,3	-61,1	-59,7	-55,2	-45,7
$\delta_{\beta 1}$ , град	0	0	0,1	0,2	0,4	0,8
$\delta_{\beta 2}$ , град	0	0	0,1	0,1	0,3	0,5
Параметры	Модифицированный метод теплового шума					
	Разность углов прихода фронта волны от первого и второго источников					
	30 град	20 град	15 град	10 град	5 град	2 град
Различимость максимумов	Да	Да	Да	Да	Да	Да
$h$ , дБ	-69,6	-69,5	-62,0	-57,1	-56,0	-50,6
$\delta_{\beta 1}$ , град	0	0	0	0,1	0,3	0,6
$\delta_{\beta 2}$ , град	0	0	0,1	0	0,5	0,6
Параметры	Модифицированный метод многосигнальной классификации					
	Разность углов прихода фронта волны от первого и второго источников					
	30 град	20 град	15 град	10 град	5 град	2 град
Различимость максимумов	Да	Да	Да	Да	Да	Да
$h$ , дБ	-87,7	-87,2	-66,6	-66,0	-60,4	-57,8
$\delta_{\beta 1}$ , град	0	0	0,1	0	0,4	0,5
$\delta_{\beta 2}$ , град	0	0	0	0,1	0,3	0,7

Анализ полученных результатов (рисунок 1 и таблица 1) позволяет сделать вывод о целесообразности использования модифицированных методов оценки пространственного спектра акустического сигнала. Для заданных исходных параметров имитационной модели классический метод Delay-and-Sum позволяет определять угловые координаты источников с ошибкой не более 0,5 градуса при разности углов между ними 30 градусов. При этих же параметрах модифицированные методы Capon, Thermal noise и MUSIC дают ту же ошибку определения угловых координат при разности углов между источниками 5 градусов, что увеличивает разрешающую способность антенной решетки на 25 градусов. Из всех модифицированных методов метод MUSIC дает наиболее глубокий провал между максимумами, что объясняется сильным подавлением помех и аддитивного шума за счет разложения корреляционной матрицы на сигнальное и шумовое подпространства.

**Список использованных источников:**

1. Acoustic Array Systems. Theory, implementation and application / R. Mingsian // National Tsing Hua University, 2013. – 527 p.
2. Нечаев, Ю.Б. Алгоритмы диаграммообразования адаптивных антенных решеток в условиях многолучевого распространения радиоволн / Ю.Б. Нечаев. – Воронеж.: Научные ведомости вып. 21/1, 2012. – С.193-202.
3. Москалец, Н.В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов / Н.В. Москалец. – Харьков: Радиотехника вып. 188, 2017. – С.126-135.