

УДК 621.391.8

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-455-460

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ МИКРОФОННЫХ РЕШЕТОК В СРЕДЕ MATLAB

А.А. Глухов

Lautsprecher Teufel GmbH, Берлин, 10787, Германия
Адрес для переписки: anton.a.glukhov@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.05.20, принята к печати 28.05.20
Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Глухов А.А. Сравнение алгоритмов формирования диаграмм направленности микрофонных решеток в среде MATLAB // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 455–460. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-455-460

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены основные количественные характеристики микрофонных решеток и применяемые при их исследовании алгоритмы формирования диаграмм направленности акустических сигналов (beamforming). **Методы.** Исследованы основные характеристики, способы вычисления и оценки. Проанализированы наиболее распространенные алгоритмы формирования диаграмм направленности: лучеформирования на базе задержки и суммирования (DAS), минимума дисперсии при неискаженном отклике (MVDR), Фроста или наименьшей дисперсии с линейными ограничениями (LCMV), подавления боковых лепестков (GSC). Расчеты и сравнительный анализ алгоритмов выполнены в среде моделирования MATLAB. Получены количественные характеристики: отношение сигнал-шум; отношение сигнал-интерференция-шум; индекс направленности; характеристики направленности; разрешающая способность. **Основные результаты.** Представлены результаты сравнения алгоритмов на примере линейной микрофонной решетки. Наиболее удовлетворительные результаты получены с использованием алгоритма LCMV. Результаты моделирования необходимо уточнять в реальных экспериментах. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы для анализа более сложных микрофонных решеток и акустических структур, таких как микрофонные решетки с «плавающей» геометрией, распределенные микрофонные решетки и другие.

Ключевые слова

микрофонная решетка, формирование диаграммы направленности, диаграмма направленности, индекс направленности, частотный отклик, пространственный отклик

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-455-460

COMPARISON OF BEAMFORMING ALGORITHMS FOR MICROPHONE ARRAYS IN MATLAB

A.A. Glukhov

Lautsprecher Teufel GmbH, Berlin, 10787, Germany
Corresponding author: anton.a.glukhov@gmail.com

Article info

Received 02.05.20, accepted 28.05.20
Article in Russian

For citation: Glukhov A.A. Comparison of beamforming algorithms for microphone arrays in Matlab. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 455–460 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-455-460

Abstract

Subject of Research. The paper considers the main quantitative characteristics of microphone arrays in their performance analysis and beamforming algorithms applied for their study. **Methods.** The principal characteristics, calculation approaches and evaluations were examined. The most widespread beamforming algorithms were analyzed, such as: Delay-and-Sum (DAS), minimum variance distortionless response (MVDR), Frost's algorithm or linearly constrained minimum variance (LCMV), generalized sidelobe canceller (GSC). The calculations and comparative analysis of the

algorithms were performed in Matlab simulation environment. The following quantitative characteristics were obtained: signal-to-noise ratio, signal-interference-noise ratio, directivity index, directivity characteristics, and beamwidth. **Main Results.** Algorithm comparison results are presented on the example of a linear microphone array. The linearly constrained minimum variance algorithm has shown the most satisfactory results. The simulation results must be clarified by real experiments. **Practical Relevance.** The results of the work can be used for analysis of more complex microphone arrays and acoustic structures, such as microphone arrays with “floating” geometry and distributed microphone arrays.

Keywords

microphone array, beamforming, directivity pattern, directivity index, frequency response, spatial response

Введение

Алгоритмы формирования диаграмм направленности акустического сигнала широко используются для решения задач локализации источника звукового сигнала. Их применение эффективно для устранения побочных акустических источников, диффузного шума или собственного шума приемника. Разработка эффективного метода формирования диаграммы направленности является сложной инженерной и математической задачей, которая, в свою очередь, требует определения эффективности того или иного применяемого подхода и сравнения его с существующими алгоритмами.

Для оценки эффективности выбранного метода важным является получение количественных характеристик, а также выбор соответствующих алгоритмов моделирования. Задача нахождения оптимального метода формирования диаграммы направленности представляет собой объединение нескольких оценок при частичном игнорировании других.

В данной работе выполнено сравнение алгоритмов формирования диаграмм направленности микрофонных решеток (МР). Рассмотрены наиболее популярные алгоритмы: лучеформирования на базе задержки и суммирования (Delay-and-Sum, DAS), минимума дисперсии при неискаженном отклике (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR), Фроста или наименьшей дисперсии с линейными ограничениями (Linearly Constrained Minimum Variance, LCMV), подавления боковых лепестков (Generalized Sidelobe Canceller, GSC). Моделирование выполнено в популярной и доступной среде MATLAB. Алгоритмы исследовались в стандартных реализациях и со стандартным заданием параметров.

Представление модели

В качестве наиболее простой модели рассмотрим модель DAS. Данная модель МР с линейной геометрией, представленная на рис. 1, предполагает фиксированное количество микрофонов, с заранее известным и одинаковым расстоянием между ними. Здесь N — количество микрофонов; l — расстояние между соседними элементами; s — источник полезного сигнала; v — шум; θ — угол относительно оси МР. Микрофоны являются всенаправленными с круговой диаграммой направленности, а их характеристики близки к идеальным.

Если допустить, что в качестве шума рассматривается аддитивный некоррелированный шум, сигнал для каждого микрофона можно представить через коэффициент затухания и составляющую задержки:

$$\begin{pmatrix} x_0(k) \\ x_1(k) \\ \vdots \\ x_{N-1}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 s_0(k - \tau_0) \\ a_1 s_1(k - \tau_1) \\ \vdots \\ a_{N-1} s_{N-1}(k - \tau_{N-1}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_0(k) \\ v_1(k) \\ \vdots \\ v_{N-1}(k) \end{pmatrix},$$

где k — дискретный момент времени; $x_i(k)$ — сигнал на входе i -го элемента; a_i — коэффициенты затухания; τ_i — относительные задержки распространения сигнала между сенсорами; v_i — аддитивный шум.

При переходе в частотную область получим

$$X(e^{j\Omega}) = S(e^{j\Omega})\mathbf{d} + V(e^{j\Omega}),$$

где X, S, V — соответственно, сигнал на входе, источник полезного сигнала и шум в частотной области; \mathbf{d} — вектор передаточных функций, описывающих распространение сигнала от целевого источника до микрофона, включающих расположение источника сигнала q , и геометрию МР; Ω — нормированная угловая частота, $j = \sqrt{-1}$. В общем виде такой вектор запишем:

$$\mathbf{d}^T = [H_0(q, \omega), H_1(q, \omega), \dots, H_{N-1}(q, \omega)],$$

где ω — радиальная частота.

Перепишем данный вектор через компоненты задержки, представленные в частотной области, и некоторым коэффициентом затухания a_n .

$$\mathbf{d}^T = [a_0 e^{-j\Omega\tau_0}, a_1 e^{-j\Omega\tau_1}, \dots, a_{N-1} e^{-j\Omega\tau_{N-1}}].$$

Результирующий сигнал, после вычисления весовых коэффициентов, будет равен

$$Y(e^{j\Omega}) = \sum W^H(e^{j\Omega})X(e^{j\Omega}), \tag{1}$$

где оператор H обозначает эрмитово сопряжение; W^H — весовые коэффициенты.

Задание весовых коэффициентов позволяет формировать необходимый вектор луча целевого направления.

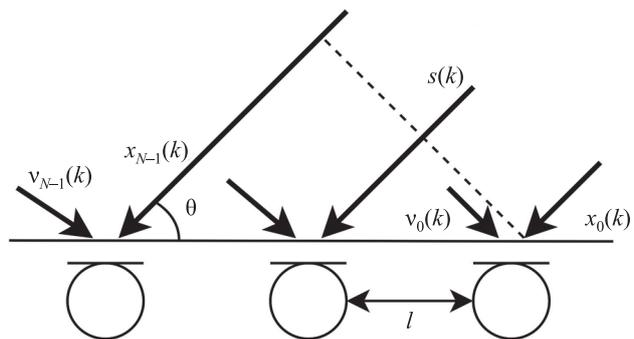


Рис. 1. Модель линейной микрофонной решетки

Методы оценки

Отношение сигнал-шум (Array-gain, AG). Одной из основных задач алгоритмов формирования диаграммы направленности является подавление посторонних шумов. За счет своей физической структуры и применяемых алгоритмов, МР способны выделять полезный сигнал «фокусируясь» на источнике, и подавлять посторонние шумы с направлений, отличных от целевого направления.

Наиболее общим методом оценки таких алгоритмов является количественная величина — отношение сигнал-шум.

Рассмотрим отношение сигнал-шум всей микрофонной решетки к отношению сигнал-шум единичного микрофона:

$$G = \frac{SNR_Y}{SNR_{x_0}}, \quad (2)$$

где SNR — отношение сигнал-шум (Signal-to-noise ratio).

Необходимо отметить зависимость от частоты параметра G . В (2) данная зависимость была опущена для упрощения представления записи.

При этом отношение сигнал-шум на входе одного микрофона можно определить из мощностей сигнала и шума, что вполне очевидно, и можно найти, например, через дисперсию сигнала и шума соответственно [1]:

$$SNR_{x_0} = \frac{\sigma_{x_0}^2}{\sigma_{v_0}^2} = a_0^2 \frac{\sigma_{s_0}^2}{\sigma_{v_0}^2},$$

где $\sigma_{x_0}^2 = E[x_0^2(k)]$, $\sigma_{v_0}^2 = E[v_0^2(k)]$, $\sigma_{s_0}^2 = E[s_0^2(k)]$ — дисперсии сигналов $x_0(k)$, $v_0(k)$ и $s_0(k)$ соответственно; E — математическое ожидание.

Выходную величину отношения сигнал-шум можно получить из выражения (1) через спектральную плотность [2].

$$\Phi_{YY} = W^H \Phi_{XX} W, \quad (3)$$

где Φ_{XX} — матрица спектральной плотности сигнала на входе микрофонов; W — весовые коэффициенты.

$$\Phi_{XX} = \begin{pmatrix} \Phi_{x_0x_0} & \Phi_{x_0x_1} & \dots & \Phi_{x_0x_{N-1}} \\ \Phi_{x_1x_0} & \Phi_{x_1x_1} & \dots & \Phi_{x_1x_{N-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{x_{N-1}x_0} & \Phi_{x_{N-1}x_1} & \dots & \Phi_{x_{N-1}x_{N-1}} \end{pmatrix}.$$

Из выражения (3), в случае, когда представлен только полезный сигнал, получим

$$\Phi_{YY} = \Phi_{SS} |W^H \mathbf{d}|^2,$$

где Φ_{SS} — матрица сигнала.

Для случая, когда представлен только шум, получим

$$\Phi_{YY} = \Phi_{V_a V_a} W^H \Phi_{V_V} W,$$

где Φ_{V_V} — нормализованная матрица спектральной плотности шума; $\Phi_{V_a V_a}$ — среднее значение шума.

Запишем результирующее выражение для нахождения параметра G

$$G = \frac{|W^H \mathbf{d}|^2}{W^H \Phi_{V_V} W}. \quad (4)$$

Используя полученное выражение (4) и подставив в него в качестве параметра спектральной плотности шума различные математические модели шумов, можно выполнить анализ эффективности данной характеристики при различных конфигурациях микрофонной решетки.

Так, например, один из самых простых вариантов — представить модель белого шума в качестве единичной матрицы.

Для того чтобы получить и сравнить результаты с разными алгоритмами, была использована модель из 10 линейных, всенаправленных микрофонов, с расстоянием между соседними элементами $l = 0,04$ м. На рис. 2 представлена схема расположения источников сигнала по отношению к МР. Данная модель построена с помощью программного обеспечения (ПО) MATLAB. Частота дискретизации сигнала — 8000 Гц, скорость распространения звуковой волны — 340 м/с.

Источник полезного сигнала S расположен по азимуту -30° , интерференционный сигнал V_1 по азимуту -10° , дополнительный интерференционный сигнал V_2 по азимуту 20° . В качестве полезного сигнала был использован записанный мужской голос из пакета MATLAB — SpeechDFT-16-8-mono-5secs.wav. Интерференционные сигналы V_1 и V_2 — FemaleSpeech-16-8-mono-3secs.wav и Laughter-16-8-mono-4secs.wav соответственно. В дополнение был использован аддитивный белый гауссовский шум. Результирующие значения для разных алгоритмов формирования диаграмм направленности представлены в таблице.

Алгоритм GSC реализован в соответствии с предложенной моделью в работах [3, 4]. GSC-формирователь луча разделяет поступающие сигналы с микрофонов и отправляет их через обычный путь формирователя луча и путь подавления боковых лепестков, а затем адаптивно выбирает веса фильтра, чтобы минимизировать мощность на выходе пути подавления боковых лепестков. Результирующий сигнал с формированием луча — разница между двумя этими трактами.

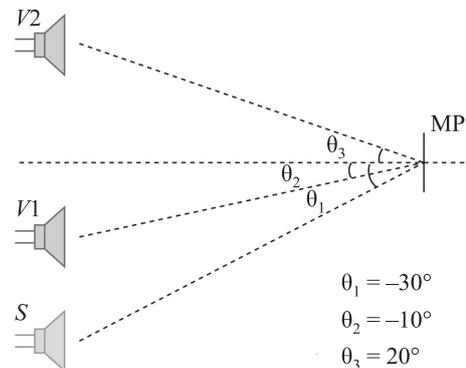


Рис. 2. Схема расположения источников сигнала по азимуту по отношению к микрофонной решетке

Таблица. Значения Array-gain для наиболее популярных алгоритмов формирования диаграмм направленности

Алгоритм	Array-gain
DAS	8,58
LCMV	14,24
MVDR	15,68
GSC	13,94

В качестве программной реализации алгоритмов MVDR, LCMV и GSC использованы модели из ПО MATLAB R2020a с параметрами по умолчанию.

Отметим, что алгоритм LCMV показывает довольно хороший результат, также как и MVDR и GSC. Несмотря на это, данный алгоритм теряет свою эффективность при потере точности целевого вектора [5, 6].

MVDR, в его стандартной реализации в ПО MATLAB, предназначен для узкополосного сигнала. Так как в данной модели использовался записанный человеческий голос, что представляет собой широкополосный сигнал, то возможно улучшение данного алгоритма для определенных параметров входного сигнала.

Помимо отношения сигнал-шум, при наличии интерференционных источников, используется отношение сигнала к интерференции плюс шум (SINR, Signal to Interference plus Noise Ratio). Данную величину можно получить, используя следующую формулу [7, 8]:

$$SINR_{x_0} = \frac{S}{\sum_{i=1}^N I_i + \sigma^2},$$

где S — мощность полезного сигнала; I — мощность интерферирующего сигнала от i -го интерферирующего источника; σ^2 — мощность шума.

Диаграмма направленности. Другой, наиболее широко используемой характеристикой, является диаграмма направленности, которая без применения ве-

совых коэффициентов и дополнительных фильтров представляет собой функцию, зависящую от углов направления источника сигнала. Диаграмму направленности можно получить из отношения сигнал-шум, описанного ранее. Функция зависит от азимута и угла высоты.

Диаграмма направленности простой линейной микрофонной решетки из 10 одинаковых элементов с шагом 0,04 м представлена на рис. 3. Микрофоны являются всенаправленными с рабочим диапазоном от 20 Гц до 20 кГц.

Удобно представлять диаграмму направленности в трехмерном виде, добавляя ось частоты (рис. 4, а), или использовать тепловую карту на двухмерном графике, как это представлено на рис. 4, б.

Из рис. 4 видно «размытие» диаграммы на нижних частотах, особенно важных при анализе и работе с голосом. Такие диаграммы, например, удобно использовать при работе с алгоритмами сверхнаправленности (Superdirective Beamforming).

Индекс направленности. Для оценки алгоритмов формирования диаграммы направленности используется индекс направленности. Данный параметр описывает эффективность алгоритма подавлять диффузный шум [2, 9]. Формула для нахождения индекса направленности (directivity index, DI) имеет вид [10]

$$DI(\omega, \theta, \varphi) = 10 \log \frac{4\pi |H(\omega, \theta_0, \varphi_0)|^2}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} |H(\omega, \theta_0, \varphi_0)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi},$$

где $H(\omega, \theta_0, \varphi_0)$ — функция пространственно-частотного отклика; θ — азимут; φ — угол высоты.

Таким образом, можно построить график зависимости индекса направленности от частоты. На рис. 5 показано сравнение индекса направленности для линейной микрофонной решетки из двух (кривая 1) и 10 (кривая 2) элементов с шагом 0,04 м.

Ширина луча. Дополнительным параметром, часто используемым при описании диаграммы направле-

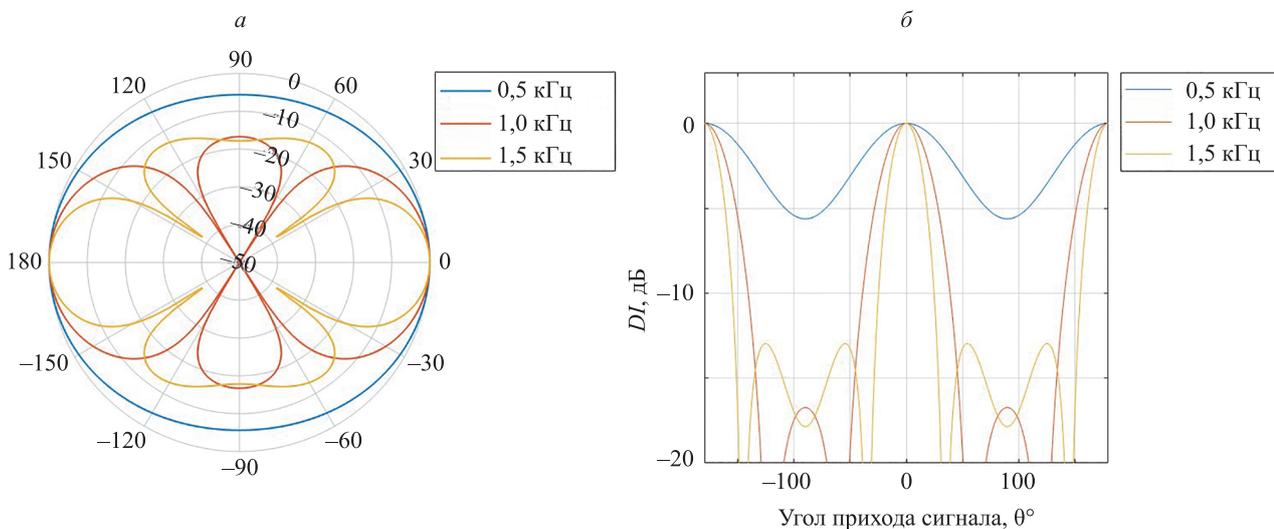


Рис. 3. Диаграмма направленности микрофонной решетки из 10 элементов с шагом 0,04 м для частот 0,5 кГц, 1,0 кГц и 1,5 кГц в полярных (а) и декартовых (б) координатах

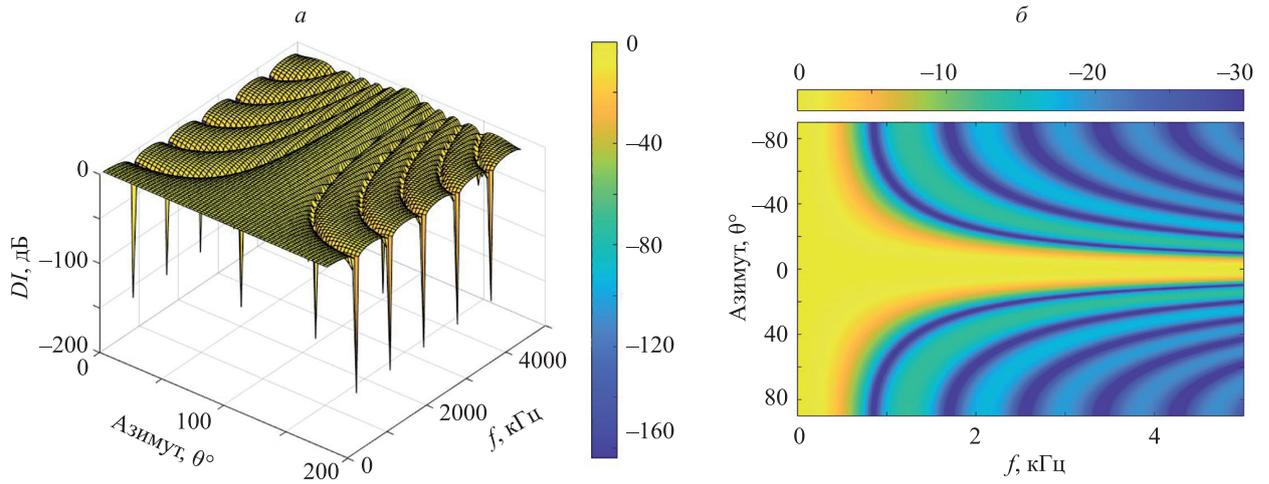


Рис. 4. Диаграмма направленности в трехмерном виде (а) и тепловая карта на двухмерном графике (б) линейной микрофонной решетки из 10 элементов с шагом 0,04 м (f — частота)

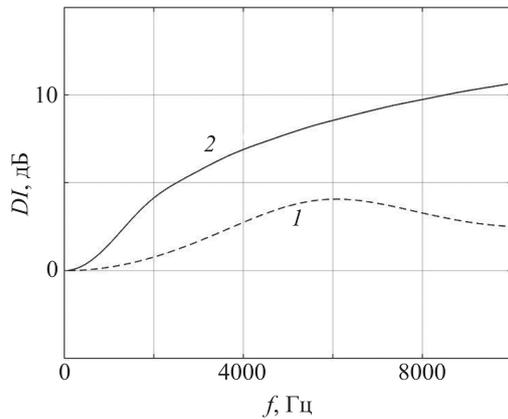


Рис. 5. Индекс направленности микрофонной решетки из двух (кривая 1) и 10 (кривая 2) элементов с шагом 0,04 м

ности, служит величина — ширина луча (beamwidth). Данный параметр показывает ширину главного лепестка на диаграмме направленности, при мощности сигнала -3 дБ. На рис. 6 представлены две вариации ширины луча для диаграммы направленности линейной МР из 10 элементов. Расстояние между соседними элементами 0,04 м.

Заключение

Представлены количественные оценки эффективности алгоритмов формирования диаграмм направленности на примере линейной микрофонной решетки. Проанализированы наиболее распространенные алгоритмы формирования диаграммы направленности, такие как LCMV, MVDR, GSC, DAS. Рассчитанные диаграммы направленности показывают недостатки в локализации источников на низких частотах, большое количество боковых лепестков на высоких частотах, что создает проблемы при шумоподавлении.

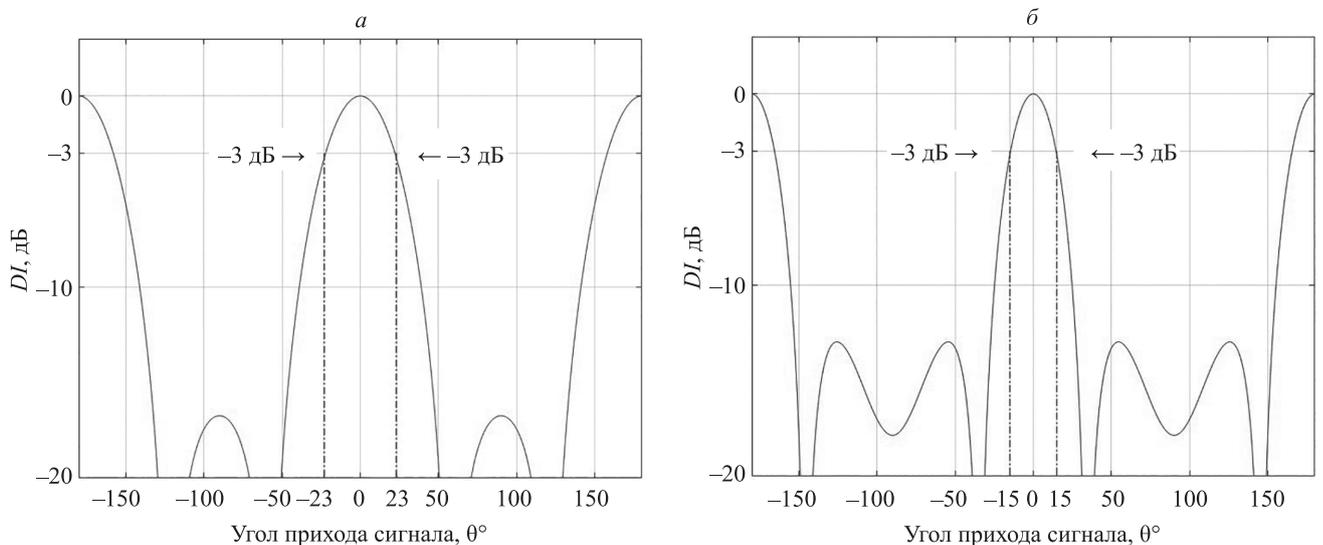


Рис. 6. Диаграмма направленности микрофонной решетки из 10 элементов при частоте сигнала: 1 кГц (а); 1,5 кГц (б)

Необходимо заметить, что алгоритмы, со стандартным заданием параметров, представленные в среде MATLAB, недостаточно подходят для работы с широкополосным сигналом и шумом. Наиболее приемле-

мые результаты получены с использованием алгоритма LCMV. Результаты моделирования необходимо уточнять в реальных экспериментальных условиях.

Литература

1. Benesty J., Chen J., Huang Y. *Microphone Array Signal Processing*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008. 240 p. doi: 10.1007/978-3-540-78612-2
2. *Microphone Arrays* / ed. by M. Brandstein, D. Ward. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2001. XVIII, 398 p. doi: 10.1007/978-3-662-04619-7
3. Griffiths L.J., Jim C.W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1982. V. 30. N 1. P. 27–34. doi: 10.1109/TAP.1982.1142739
4. Van Trees H. *Optimum Array Processing*. New York: Wiley-Interscience, 2002. 1472 p. doi: 10.1002/0471221104
5. Lorenz R.G., Boyd S.P. Robust minimum variance beamforming // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2005. V. 53. N 5. P. 1684–1696. doi: 10.1109/TSP.2005.845436
6. Vorobyov S.A., Gershman A.B., Luo Z.-Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2003. V. 51. N 2. P. 313–324. doi: 10.1109/TSP.2002.806865
7. Rappaport T.S. *Wireless Communications: Principles & Practice*. 2nd ed. Prentice-Hall, 2002. 640 p.
8. Гайдамака Ю.В., Самуйлов А.К. Метод расчета характеристик интерференции двух взаимодействующих устройств в беспроводной гетерогенной сети // *Информатика и ее применения*. 2015. Т. 9. № 1. С. 9–14. doi: 10.14357/19922264150102
9. Столбов М.Б., Тхе Куан Чонг. Прием речевых сигналов в шумовой обстановке с использованием двухэлементных микрофонных решеток // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 5. С. 850–857. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-850-857
10. *Beamformer Data Specification for Eigenmike Software Beamformer*. Version 2 Rev. A. Eigenmike, EigenStudio, and EigenUnits are trademarks of mh acoustics, LLC, 2017. 26 p.

Авторы

Глухов Антон Александрович — разработчик программного обеспечения встраиваемых систем, Lautsprecher Teufel GmbH, Берлин, 10787, Германия, ORCID ID: 0000-0002-1162-0331, anton.a.glukhov@gmail.com

References

1. Benesty J., Chen J., Huang Y. *Microphone Array Signal Processing*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2008, 240 p. doi: 10.1007/978-3-540-78612-2
2. *Microphone Arrays*. Ed. by M. Brandstein, D. Ward. Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 2001, XVIII, 398 p. doi: 10.1007/978-3-662-04619-7
3. Griffiths L.J., Jim C.W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 27–34. doi: 10.1109/TAP.1982.1142739
4. Van Trees H. *Optimum Array Processing*. New York, Wiley-Interscience, 2002, 1472 p. doi: 10.1002/0471221104
5. Lorenz R.G., Boyd S.P. Robust minimum variance beamforming. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, vol. 53, no. 5, pp. 1684–1696. doi: 10.1109/TSP.2005.845436
6. Vorobyov S.A., Gershman A.B., Luo Z.-Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, vol. 51, no. 2, pp. 313–324. doi: 10.1109/TSP.2002.806865
7. Rappaport T.S. *Wireless Communications: Principles & Practice*. 2nd ed. Prentice-Hall, 2002, 640 p.
8. Gaidamaka Yu.V., Samuylov A.K. Method for calculating numerical characteristics of two devices interference for device-to-device communications in a wireless heterogeneous network. *Informatics and Applications*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 9–14. (in Russian)
9. Stolbov M.B., Trong The Quan. Speech acquisition in noisy environments using dual microphone arrays. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 18, no. 5, pp. 850–857. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-850-857 (in Russian)
10. *Beamformer Data Specification for Eigenmike Software Beamformer*. Version 2 Rev. A. Eigenmike, EigenStudio, and EigenUnits are trademarks of mh acoustics, LLC, 2017, 26 p.

Authors

Anton A. Glukhov — Linux Embedded Software Developer, Lautsprecher Teufel GmbH, Berlin, 10787, Germany, ORCID ID: 0000-0002-1162-0331, anton.a.glukhov@gmail.com