

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МИКРОФОННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ МИКРОФОНОВ

S.V. Perelygin, A.V. Krivosheykin

MICROPHONE ARRAY SENSITIVITY TO THE EFFECT OF INHERENT NOISE OF MICROPHONES

Исследовано влияние собственных шумов микрофонной антенной решетки на эффективность пространственной обработки широкополосных речевых сигналов: на точность определения направлений прихода акустических сигналов от двух источников при их одновременном воздействии; на степень подавления мешающего сигнала; на субъективную оценку заметности мешающего сигнала, подавленного не полностью.

МИКРОФОННАЯ РЕШЕТКА; ПОЛЕЗНЫЙ И МЕШАЮЩИЙ РЕЧЕВОЙ СИГНАЛ; ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ; ПОДАВЛЕНИЕ СИГНАЛА.

In this article we explore the influence of a microphone array's inherent noise on the efficiency of the spatial processing of wideband speech signals; on the accuracy of determining the directions from which acoustic signals arrive (if a microphone array receives two broadband acoustic signals at the same time); on the degree of interfering signal suppression; on the subjective assessment of the interfering signal which is not completely suppressed. The inherent noise of the array introduces an error in determining the signal source direction. The authors have obtained mathematical dependences which allow to find the ultimate signal/noise ratio, providing the interfering signal suppression which satisfies a predetermined expert opinion value.

MICROPHONE ARRAY; WANTED AND INTERFERING SPEECH SIGNALS; SIGNAL/NOISE RATIO; SIGNAL SUPPRESSION.

Микрофонные решетки представляют собой набор приемников акустических сигналов, объединенных в массив и обеспечивающих заданную диаграмму направленности акустических антенн [1].

В [2] рассмотрена настройка микрофонной решетки, принимающей широкополосные акустические сигналы одновременно от двух источников. При *точно* известных направлениях прихода сигналов настроенная решетка обеспечивает полное подавление сигнала, приходящего по одному угловому направлению, и неискаженный прием сигнала, приходящего по

другому угловому направлению.

В [3] описан способ определения направлений прихода плоских звуковых волн от двух источников при их одновременном воздействии на микрофонную решетку. Способ заключается в адаптации метода Кейпона [4, 5] для широкополосного сигнала. Показано, что при высоком отношении сигнал/шум (ОСШ) и, в частности, при отсутствии собственных шумов имеет место точное определение направлений прихода широкополосных акустических сигналов, что, в свою очередь, гарантирует их эффективное пространственное разделение (вы-



Рис. 1. Эквидистантная линейная решетка из четырех микрофонов

деление полезного сигнала при полном подавлении мешающего сигнала).

В данной статье исследуется влияние собственных шумов решетки на эффективность пространственной обработки широкополосных речевых сигналов.

Влияние собственных шумов решетки на точность определения направлений прихода сигналов

Для оценки влияния собственных шумов решетки на точность определения направ-

лений прихода сигналов были проведены модельные эксперименты с использованием среды Matlab. В процессе эксперимента создали два речевых сигнала и имитировали процесс совместного воздействия этих сигналов на эквидистантную решетку из четырех идентичных ненаправленных микрофонов (рис. 1) с коэффициентами передачи, равными единице.

Расстояние между микрофонами было выбрано равным $d = 0,05$ м, истинные направления на источники сигналов равнялись $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$. В ходе эксперимента задавалось требуемое численное значение ОСШ η . Далее генерировался белый (гауссовский) шум такой мощности, чтобы отношение мощности одного из речевых сигналов к мощности шума равнялось заданному значению ОСШ. После имитации совместного воздействия двух речевых сигналов на решетку из четырех микрофонов к «смеси» сигналов с выхода каждого микрофона добавлялся сгенерированный белый шум. Результирующие сигналы, содержавшие «смесь» белого шума и двух речевых сигналов, подвергались обработке по моди-

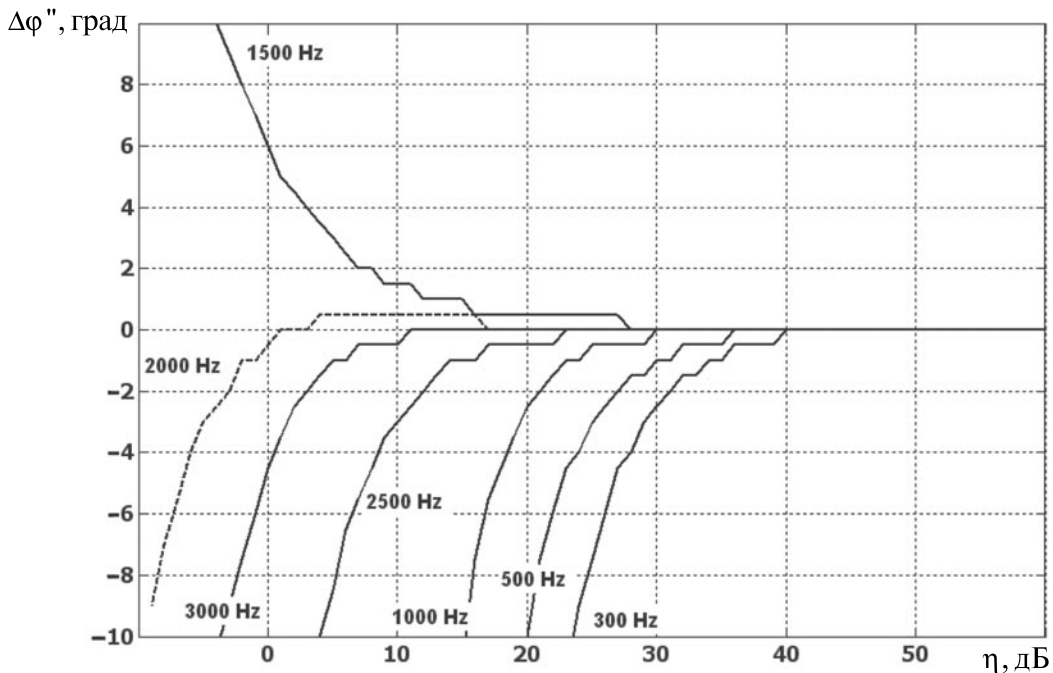


Рис. 2. Зависимости ошибки в определении направления прихода сигнала от ОСШ для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$

фицированному методу Кейпона [3].

Рассмотрим полученные в ходе моделирования графики зависимостей ошибки в определении направления прихода мешающего широкополосного сигнала от ОСШ $\Delta\varphi''(\eta_{дБ})$ на разных частотах (рис. 2).

Как следует из рисунка, для всех частот уменьшение ОСШ приводит к увеличению ошибки в определении направления прихода сигнала. На низких частотах ошибка появляется при больших значениях ОСШ и при уменьшении ОСШ быстрее возрастает. Ошибка в определении направлений прихода сигналов влечет за собой неполное

подавление мешающего сигнала.

Влияние собственных шумов решетки на степень подавления мешающего сигнала

Если реальный угол падения мешающего сигнала отличается от угла настройки, то отклик настроенной решетки будет содержать не только полезный, но и ненулевой мешающий сигнал. Степень подавления мешающего сигнала, т. е. отношение мощности мешающего сигнала на входе решетки к мощности мешающего сигнала на выходе решетки, может быть рассчитана по следующей формуле [6]:

$$\Delta A_{дБ}'' = -20 \cdot \lg \left| \frac{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin(\varphi'' + \Delta\varphi''))}{c}\right)}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)} \right|, \tag{1}$$

где c – скорость распространения звуковой волны; d – расстояние между микрофонами; φ' и φ'' – углы прихода сигналов от первого и второго источников соответственно; $\Delta\varphi''$ – ошибка в определении направления на источник мешающего сигнала; ω – циклическая частота; j – мнимая единица.

На рис. 3 представлены рассчитанные

по (1) зависимости степени подавления мешающего сигнала от ошибки в определении его направления прихода на разных частотах. Истинные направления прихода сигналов: $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$. Прочие параметры: скорость звука $c = 340$ м/с, расстояние между микрофонами $d = 0,05$ м.

Как видно из рисунка, даже при незна-

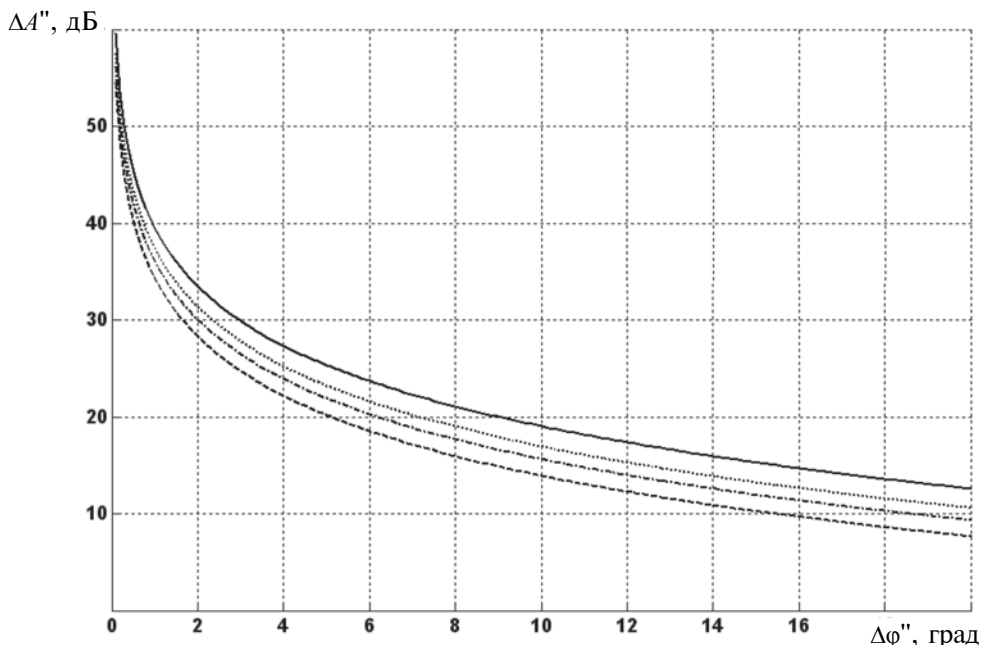


Рис. 3. Зависимости степени подавления мешающего сигнала от ошибки в определении его направления прихода для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$
 (—) 300 Гц; (.....) 1000 Гц; (-·-·-) 2000 Гц; (- - - -) 2500 Гц

чительной ошибке в определении направления на источник мешающего сигнала степень подавления мешающего сигнала становится отличной от бесконечности. С увеличением ошибки для всех частот степень подавления мешающего сигнала уменьшается.

Совмещая зависимости $\Delta\varphi''(\eta_{дБ})$, полученные с помощью моделирования (рис. 2), и зависимости $\Delta A_{дБ}''(\Delta\varphi'')$, рассчитанные по (1), получаем результирующие графики степени подавления мешающего сигнала от ОСШ (рис. 4) для каждой частоты. Реальные направления прихода сигналов остаются прежними: $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$.

Поясним содержание графиков, представленных на рис. 4.

1. Для больших значений ОСШ ошибка в определении направления прихода сигнала равна нулю, в связи с чем степень подавления мешающего сигнала стремится к бесконечности. Соответственно, для каждого из графиков, т. е. для каждой частоты, можно определить максимальное ОСШ $\eta_{дБ\ max}$, при превышении которого ошибка $\Delta\varphi''$ скачком изменяется до нуля, а значение $\Delta A_{дБ}''$ устремляется к бесконечности.

2. Для малых значений ОСШ ошибка в определении направления прихода сильно возрастает. Соответственно, на каждой частоте можно определить минимальное ОСШ $\eta_{дБ\ min}$, ниже которого решетка *не способна* определить, что на нее воздействуют два источника. Таким образом, каждый из графиков $\Delta A_{дБ}''(\eta_{дБ})$ построен для значений $\eta_{дБ}$, лежащих в интервале $\eta_{дБ\ min} \div \eta_{дБ\ max}$.

3. Как следует из рис. 4, степень подавления мешающего сигнала уменьшается с уменьшением ОСШ. Собственный шум решетки оказывает отрицательное влияние в большей степени на частоты, лежащие на краях диапазона 300 ÷ 3000 Гц. При этом особенно чувствительными к воздействию собственного шума оказываются низкие частоты: 300 и 500 Гц.

Заметность мешающего сигнала при ошибочной настройке решетки

Для исследования субъективной оценки заметности мешающего сигнала, подавленного не полностью при ошибочной настройке решетки, были проведены экспертные статистические испытания. В качестве исходного материала использовалась аудиозапись сигналов, полученных с выхо-

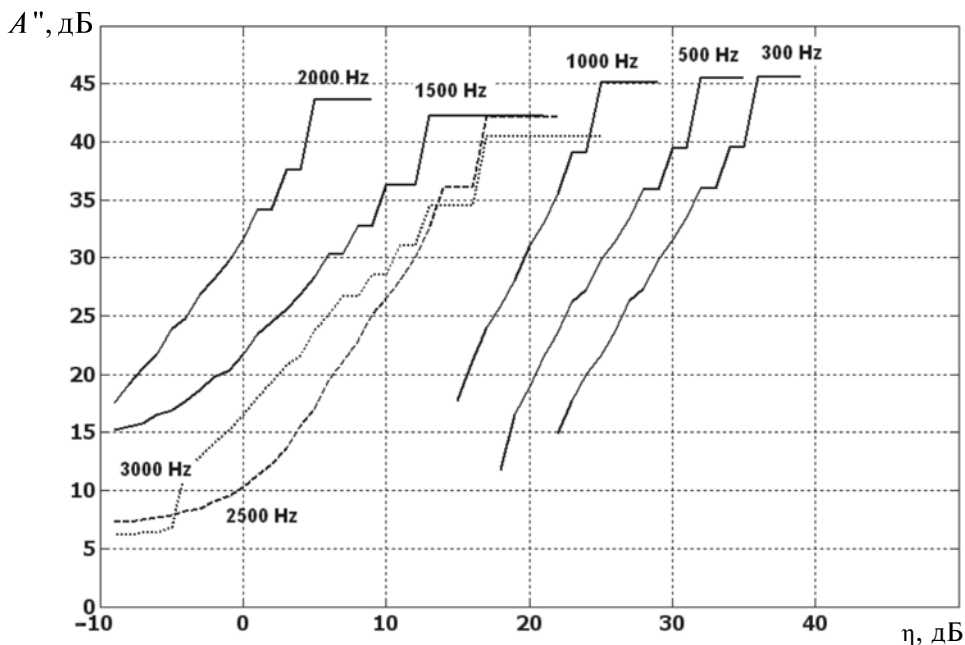


Рис. 4. Зависимости степени подавления мешающего сигнала от ОСШ для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$

да двух имитированных микрофонов. Эти сигналы представляли собой смесь двух голосов дикторов, находившихся под разными точно известными углами к решетке $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$ и говоривших одновременно. В ходе каждого испытания задавалось отклонение от истинного направления на источник мешающего сигнала. С учетом этого отклонения формировался результирующий сигнал, прошедший обработку в «ошибочно» настроенной решетке и содержащий смесь полезного и мешающего сигнала, подавленного не полностью. Затем задавалось новое значение отклонения, и формировался новый результирующий сигнал.

Полученная совокупность сигналов прослушивалась по очереди через головные телефоны и субъективно оценивалась экспертами: преподавателями и студентами Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (СПбГИКиТ) в общем количестве 92 человека. Перед каждым из экспертов была поставлена задача оценить заметность мешающего сигнала, звучащего на фоне речи

целевого диктора. Для оценки заметности искажений, в соответствии с рекомендацией ITU-R BS.1284-1 [7], использовалась 5-балльная шкала со следующими градациями: 5 – искажения незаметны; 4 – искажения заметны, но не мешают; 3 – искажения немного мешают; 2 – искажения мешают и раздражают; 1 – искажения сильно мешают. Оценки, выставленные экспертами, далее подвергались статистической обработке.

Усредненные результаты субъективных оценок заметности мешающего сигнала и доверительные интервалы представлены в виде графика на рис. 5.

Полученная зависимость оценки заметности мешающего сигнала от ошибки решетки в совокупности с графиками $\Delta\varphi''(\eta_{дБ})$ (рис. 2) и $\Delta A_{дБ}''(\eta_{дБ})$ (рис. 4) может использоваться в следующих задачах. Задача первого типа: найти такое ОСШ, при котором обеспечивается заданное значение оценки заметности мешающего сигнала. Задача второго типа дуальна первой.

Рассмотрим пример решения задачи первого типа. Сначала задаемся произволь-

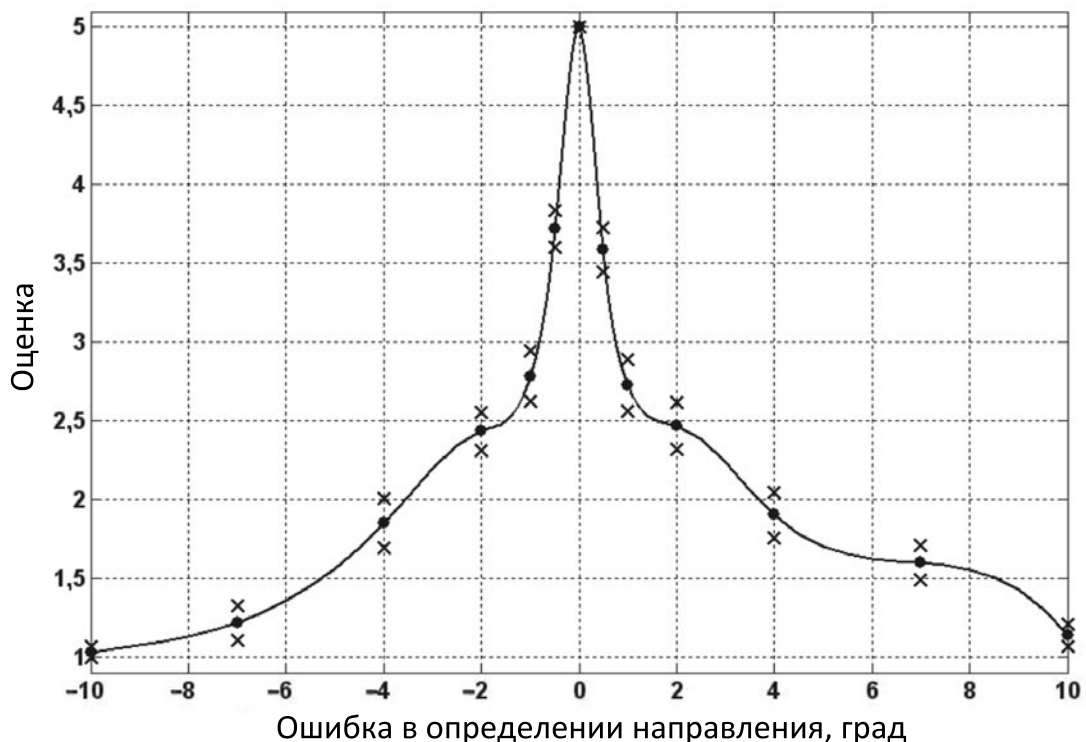


Рис. 5. Зависимость оценки заметности мешающего сигнала от ошибки в определении направления на мешающий источник

ной оценкой, например, со значением 4 (мешающий сигнал заметен, но не мешает). По графику на рис. 5 находим соответствующую этой оценке ошибку решетки (примерно 0,5 градуса). Далее по графику $\Delta\varphi''(\eta_{дб})$ на рис. 2 устанавливаем предельное значение ОСШ, выше которого ошибка решетки меньше или равна 0,5 градуса. Так, для частотной компоненты 300 Гц, наиболее чувствительной к воздействию собственного шума решетки, предельное значение ОСШ равно 35 дБ. Наконец, анализируя зависимость $\Delta A_{дб}''(\eta_{дб})$ на рис. 4, получаем, что при ОСШ, равном 35 дБ, на частоте 300 Гц обеспечивается подавление мешающего сигнала примерно на 46 дБ. На практике, исходя из требований психоакустики [8, 9] к степени подавления мешающего сигнала, в

каждом отдельно взятом случае предельное ОСШ можно устанавливать для той частотной компоненты полезного сигнала, модуль которой имеет наибольшее значение.

Собственный шум решетки вносит погрешность в определение направлений на источники сигналов, в результате чего в процессе пространственного разделения мешающий сигнал оказывается подавленным не полностью. Зависимость оценки заметности мешающего сигнала от ошибки решетки совместно с графиками $\Delta\varphi''(\eta_{дб})$ и $\Delta A_{дб}''(\eta_{дб})$ дает возможность найти предельное отношение сигнал/шум, при котором обеспечивается подавление мешающего сигнала, удовлетворяющее заданному значению экспертного мнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Столбов М.Б.** Применение микрофонных решеток для дистанционного сбора речевой информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 661–675.
2. **Кривошейкин А.В., Перельгин С.В.** Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 221–225.
3. **Кривошейкин А.В., Перельгин С.В., Смирнов И.Н., Иванова А.Ф.** Анализ работы микрофонной антенной решетки для широкополосных акустических сигналов // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 1(59). С. 66–68.
4. **Capon J.** High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proc. IEEE. 1969.

Vol. 57. No. 8. Pp. 1408–1418.

5. **Ермолаев В.Т., Флакман А.Г.** Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой: Учеб.-метод. материалы. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. 98 с.
6. **Кривошейкин А.В., Перельгин С.В.** Моделирование микрофонной антенной решетки // Мир техники кино. 2015. № 1(35). С. 22–26.
7. Rec. ITU-R BS.1284-1. General methods for the subjective assessment of sound quality. 1997–2003.
8. **Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П.** Акустика: Учебник для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2009. 660 с.
9. **Вахитов Я.Ш.** Слух и речь: конспект лекций по курсу «Электроакустика». Л.: Изд-во ЛИКИ, 1973. 122 с.

REFERENCES

1. **Stolbov M.B.** Primeneniye mikrofonnykh reshetok dlya distantsionnogo sbora rechevoy informatsii [Application of microphone arrays for distant speech capture]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2015, Vol. 15, No. 4, Pp. 661–675. (rus)
2. **Krivosheykin A.V., Perelygin S.V.** Mikrofonnaya reshetka dlya realizatsii napravlennoy akusticheskoy antennoy [Microphone array for directional acoustic antenna implementation]. *Izv. vuzov. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2015, Vol. 58, No. 3,

Pp. 221–225. (rus)

3. **Krivosheykin A.V., Perelygin S.V., Smirnov I.N., Ivanova A.F.** Analiz raboty mikrofonnoy antennoy reshetki dlya shirokopolosnykh akusticheskikh signalov [Analysis of the antenna array microphone for broadband acoustic signals]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Control Systems and Information Technology], 2015, No. 1(59), Pp. 66–68. (rus)
4. **Capon J.** High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proc. IEEE*, 1969, Vol. 57, No. 8, Pp. 1408–1418.
5. **Yermolayev V.T., Flaksman A.G.** *Metody otsenivaniya parametrov istochnikov signalov i*

pomekh, prinyimayemykh antennoy reshetkoy [Methods of estimating the parameters of signal sources and interference received by the antenna array]. Nizhniy Novgorod: NNGU Publ., 2007, 98 p. (rus)

6. **Krivosheykin A.V., Perelygin S.V.** Modelirovaniye mikrofonnoy antennoy reshetki [Microphone array modeling]. *Mir tekhniki kino*, 2015, No. 1(35), Pp. 22–26. (rus)

7. *Rec. ITU-R BS.1284-1. General methods for the*

subjective assessment of sound quality, 1997–2003.

8. **Vakhitov Sh.Ya., Kovalgin Yu.A., Fadeyev A.A., Shchevyev Yu.P.** *Akustika* [Acoustics]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2009, 660 p. (rus)

9. **Vakhitov Ya.Sh.** *Slukh i rech: konspekt lektsiy po kursu Elektroakustika* [Hearing and speech: the abstract of lectures on Electroacoustics]. Leningrad: LIKI Publ., 1973, 122 p. (rus)

ПЕРЕЛЫГИН Сергей Васильевич – ассистент кафедры радиотехники и информационных технологий факультета технологий кино и телевидения Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

PERELYGIN Sergey V. *St. Petersburg State University of Film and Television.*

191119, Pravdy Str. 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

КРИВОШЕЙКИН Анатолий Валентинович – профессор кафедры радиотехники и информационных технологий факультета технологий кино и телевидения Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, доктор технических наук.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: krivAV@yandex.ru

KRIVOSHEYKIN Anatoly V. *St. Petersburg State University of Film and Television.*

191119, Pravdy Str. 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: krivAV@yandex.ru