

УДК 621.391,519.216+621.396.67.012

## РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ПРИ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА С ПОМОЩЬЮ СЛУЧАЙНО-НЕРАВНОМЕРНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2020 г. **В. И. Турчин**<sup>1</sup>, **А. А. Родионов**<sup>1, \*</sup>, **А. С. Иваненков**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”,  
Нижний Новгород, Россия

\*E-mail: alexr@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Показана возможность значительного расширения рабочего диапазона частот линейных гидроакустических антенных решеток за счет использования неравномерного расположения приемных элементов. Обсуждаются характеристики синтезированной с учетом практических ограничений антенной решетки. Приведены результаты обработки экспериментальных данных, демонстрирующие эффективность предложенной методики.

DOI: 10.31857/S0367676520060307

### ВВЕДЕНИЕ

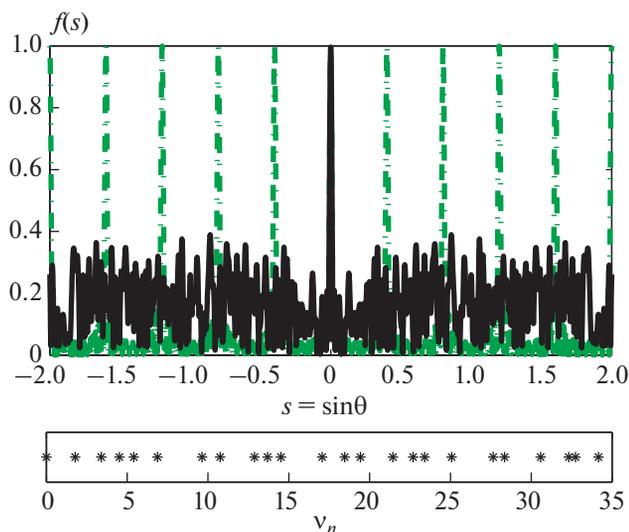
В гидроакустике весьма важной является задача пеленгации широкополосных источников звука. Для этого используются линейные антенные решетки (АР) [1]. Стандартные эквидистантные антенны, используемые в большинстве случаев, имеют ограничение на верхнюю частоту пеленгуемого сигнала  $f \leq f_{max}$ , где  $f_{max} = c/(2d)$ ,  $d$  – межэлементное расстояние АР,  $c$  – скорость звука в воде. Длина такой АР равна  $L_A = N\lambda/2$ , где  $N$  – число элементов АР,  $\lambda = c/f_{max}$  – минимальная длина волны. Однако наряду со стандартными АР достаточно часто рассматривают так называемые разреженные АР [2–5], у которых  $L_A > N\lambda/2$ . Последние обладают большим угловым разрешением по сравнению со стандартными АР при практически одной и той же сложности реализации аппаратного комплекса. В качестве количественной характеристики удобно ввести коэффициент разреженности  $U = 2L_A/(N\lambda)$ , определяющий увеличение углового разрешения. Особенностью разреженных АР является их неэквидистантность: в противном случае возникает неоднозначность в оценке пеленга. Соответственно возникает проблема выбора местоположения приемных элементов с целью, например, минимизации уровня боковых лепестков (УБЛ). Как правило, при этом еще требуется учитывать физический размер приемного элемента, накладывающий очевидное ограничение сверху на расстояние между соседними элементами. В литературе имеется достаточно примеров расчета оптимальных положений приемных элементов на осно-

ве различных регулярных алгоритмов [2–5], однако, как правило, для  $U$  порядка нескольких единиц.

В настоящей работе используется иной подход [6], свободный от ограничений на  $U$  и  $N$ . Рассмотрим случайно-равномерные АР, у которых полная длина разбивается на  $N$  интервалов длиной  $d = L_A/N$ , а элементы могут располагаться произвольно внутри этих интервалов<sup>1</sup>. Далее используется большая выборка векторов  $\mathbf{\epsilon}_j = (\epsilon_{j,1}, \dots, \epsilon_{j,N})$ ,  $j = 1, \dots, J_r$ , где  $\epsilon_{j,n}$  – независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале  $[0, 1]$ . Последние после соответствующего масштабирования определяют реализации расположения элементов АР. Как показано в [6], при  $J_r > 10^4 \dots 10^6$  (где  $J_r$  – число реализаций) среди полученных реализаций ДН можно выбрать по крайней мере одну, например, с приемлемым для практики УБЛ.

Все выводы об эффективности, приведенные в статье, используют вероятностную характеристику – вероятность обнаружения и оценки (ВОО), введенную в [6]. ВОО учитывает, наряду с вероятностью обнаружения, вероятность так называемой аномальной ошибки [7–9], заключающейся в резком отклонении оценок положения максимума от области истинного значения. Соответственно, сравнительная эффективность пеленгатора в разных условиях может определяться либо

<sup>1</sup> Такой подход с хорошей точностью фиксирует ширину главного лепестка диаграммы направленности (ДН) независимо от конкретного расположения элементов.



**Рис. 1.** ДН, соответствующая минимальному  $УБЛ_{max} = 0.39$  в выборке объемом  $10^5$  (черная сплошная линия). Зеленой пунктирной линией показана ДН для разреженной эквидистантной АР той же апертуры. Внизу приведено расположение приемных элементов в неэквидистантной АР (звездочки).

по величине ВОО при фиксированном ОСШ, либо по изменению ОСШ, необходимому для достижения определенной ВОО.

В статье в разделе 1 исследуются результаты стохастического синтеза разреженной неэквидистантной АР с учетом практического ограничения в виде минимального межэлементного расстояния. Также представлена реальная синтезированная и изготовленная АР, для которой частотный диапазон был расширен в 5 раз с учетом упомянутого ограничения. В разделе 2 приводятся результаты экспериментального подтверждения возможности расширения частотного диапазона АР за счет использования неэквидистантности.

## 1. СИНТЕЗ НЕЭКВИДИСТАНТНОЙ РАЗРЕЖЕННОЙ АР С УЧЕТОМ РАЗМЕРА ПРИЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА

Как уже отмечалось во Введении, в случайноравномерной АР элементы располагаются внутри интервалов длиной  $d = D/N$ , где  $D$  – длина АР. С учетом конечной длины приемного элемента  $d_e$  длина интервала, внутри которого помещается приемный элемент, должна быть уменьшена до величины  $d_h = d - d_e$ . В качестве параметра, учитывающего размер элемента, использовано отношение  $\delta = d_h/d$ . Для статистического синтеза использована выборка случайных величин, равномерно распределенных в интервале  $[0, 1]$ , объемом  $J_r = 10^5$ . В качестве примера на рис. 1 приведена ДН, полученная в результате синтеза для разрежен-

ной АР с  $N = 24$ ,  $U = 5$ ,  $\delta = 0.73$  (черная сплошная линия). Зеленой пунктирной линией представлена ДН для разреженной эквидистантной АР с той же апертурой. Диаграмма направленности АР  $|f(s)|$  определяется следующим образом

$$|f(s)| = \left| \sum_{n=1}^N e^{i\pi U v_n s} \right|, \quad v_n = n - 1/2 + (\epsilon_n - 1/2)\delta,$$

где  $\epsilon_n \in [0, 1]$ ,  $s = \sin \theta$  – синус пеленга,  $\theta$  – угол пеленга. Приведенный пример соответствует изготовленной в ИПФ РАН неэквидистантной АР, входящей в автономный гидроакустический комплекс “Норма”. Синтез этой антенны проводили с учетом минимального межэлементного расстояния, составляющего 0.4 м ( $\delta = 0.73$ ), а также с учетом погрешности установки гидрофонов  $\pm 0.07$  м. “Стартовое” межэлементное расстояние составляло 1.5 м (максимальная частота 500 Гц); целью было расширение частотного диапазона в 5 раз, то есть до 2500 Гц. В результате получилась АР с  $УБЛ_{max} = 0.39$ ; получившееся расположение элементов показано на рис. 1 внизу. В качестве критерия, по которому определяется “наилучшая” конфигурация приемных элементов, был взят минимум уровня наибольшего бокового лепестка  $УБЛ_{max}$ . Выбор такого критерия подтверждается результатами, полученными в [6], в соответствии с которыми ухудшение характеристик обнаружения разреженной АР, по сравнению с характеристиками заполненной АР с тем же числом элементов, целиком определяется вероятностью появления аномальных ошибок, которые связаны с величиной  $УБЛ_{max}$ .

Как показано в [6], в отсутствие ограничений на размер приемного элемента минимальное значение  $УБЛ_{max}$  будет падать с увеличением  $N$  и расти с увеличением степени разреженности  $U$ , но очень медленно. Ограничение в целом с уменьшением  $\delta$  должно приводить к увеличению  $УБЛ_{max}$ , поскольку при  $\delta \rightarrow 0$  АР становится эквидистантной и будет иметь решетчатые лепестки с уровнем, близким к 1. В качестве иллюстрации на рис. 2 показана зависимость минимального  $УБЛ_{max}$  от  $\delta$  для АР с  $N = 64$ ,  $U = 10$ ,  $J_r = 10^4$ . Как видно из графика,  $УБЛ_{max}$  практически постоянен, когда  $0.7 \leq \delta \leq 1$ , а при дальнейшем снижении  $\delta$   $УБЛ_{max}$  начинает достаточно быстро расти. При этом стоит отметить, что увеличение  $УБЛ_{max}$  вплоть до 0.7 весьма незначительно влияет на характеристики шумопеленгатора – требование на ОСШ ужесточается на 1.5–2 дБ [6].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для демонстрации эффективности использования неэквидистантных разреженных АР при пеленгации источников с использованием адап-

тивных методов были обработаны данные проведенной в 1998 г. серии экспериментов на оз. Санхар во Владимирской области. В экспериментах для записи сигналов использовали эквидистантную АР из  $N = 64$  гидрофонов с шагом  $d = 0.19$  м. Для обработки был выбран эксперимент, в котором АР располагалась в горизонтальной плоскости и принимала сигнал от политонального гидроакустического излучателя, находящегося в дальней зоне АР, с максимальной частотой излучения  $f_0 = 4.5$  кГц. Для демонстрации возможностей разреженных антенн можно из всех 64 гидрофонов выбрать некоторую небольшую часть. При этом за счет использования специального способа выбора части элементов может быть синтезирована неэквидистантная АР. В данном случае имеется жесткое ограничение на минимальное межэлементное расстояние — оно не может быть меньше, чем исходное  $d$ . Тем не менее, получаемая в результате синтеза конфигурация АР, как показано ниже, позволяет продемонстрировать эффективность разреженных неэквидистантных антенн в реальных условиях. Для синтеза разреженной АР было выбрано  $N_s = N/4 = 16$  элементов. Для максимальной частоты излучателя  $f_0$  соответствующая эквидистантная АР с межэлементным расстоянием  $4d$  является разреженной, и пеленг на источник не может быть однозначно определен. Для синтеза конфигурации неэквидистантной АР воспользуемся предложенным ранее критерием минимума максимального бокового лепестка (УБЛ<sub>max</sub>) ДН АР. Для рассматриваемого случая прямой перебор всех возможных конфигураций (их число порядка  $10^{14}$ ) представляет собой сложную вычислительную задачу. Для снижения вычислительной сложности было предложено воспользоваться приближенным методом, заключающимся в выборе “наилучшей” конфигурации АР из  $L$  случайных равновероятных выборок  $N_s$  положений элементов из исходного числа элементов  $N$ . Как показали результаты численного моделирования, получаемые конфигурации АР в результате применения описанной процедуры, выполненной для разных испытаний с  $L = 10^5$ , позволяют получить диаграммы направленности с несущественными различиями в УБЛ<sub>max</sub>. Можно заключить, что получаемая конфигурация с большой долей вероятности близка к оптимальной.

Результат пеленгации (пеленгационный рельеф  $p_d$ ) с использованием полученной неэквидистантной АР при фазировании на угол пеленга  $\theta$ , отсчитываемого от нормали АР, изображен жирной линией на рис. 3а. Эта зависимость была получена по узкополосному сигналу длительностью 20 с на центральной частоте  $f_0$  в полосе 10 Гц. В принимаемой выборке сигнала присутствовали сигнал от излучателя на частоте  $f_0$ , соответствующей

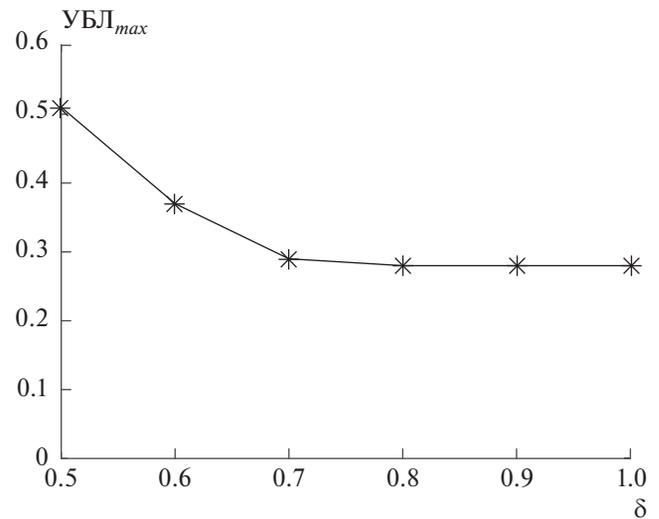
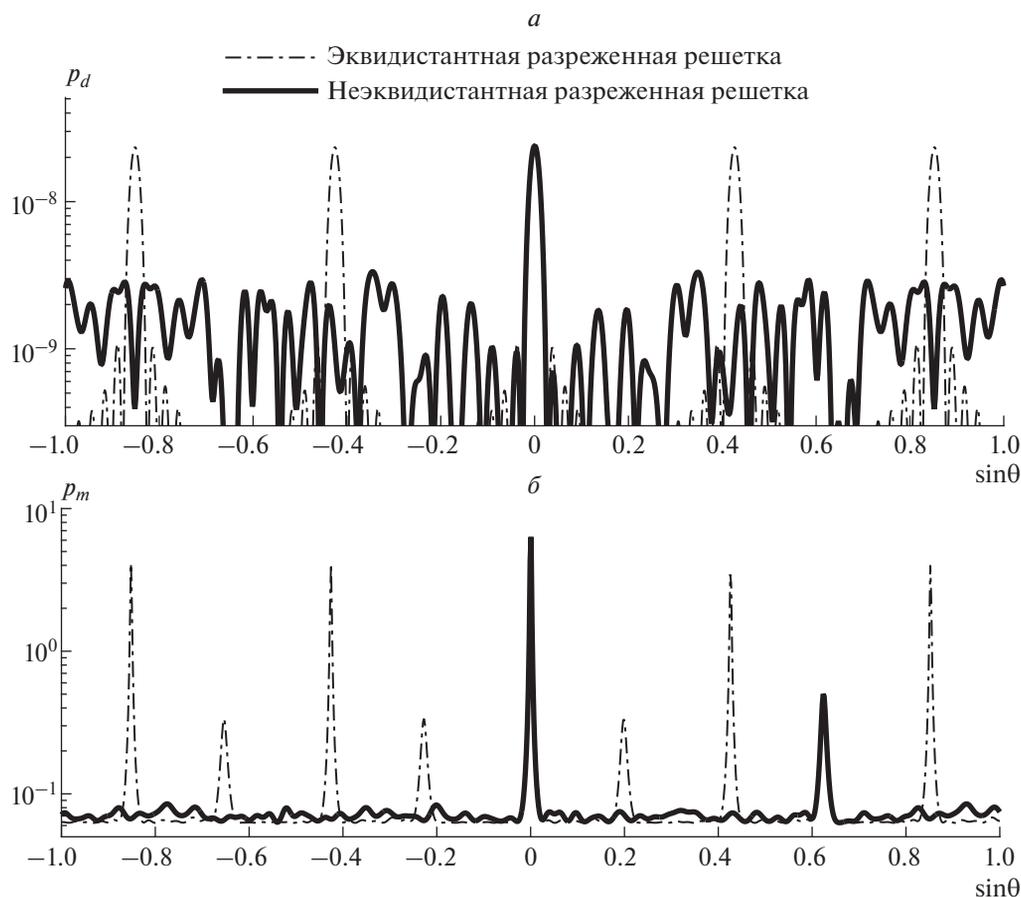


Рис. 2. Зависимость минимального УБЛ<sub>max</sub> от  $\delta$ .

щей пеленгу  $\theta = 65^\circ$ , и мощная синфазная помеха ( $\theta = 0^\circ$ ). Для сравнения штрихпунктирной линией на этом рисунке изображен результат пеленгации, полученный с использованием соответствующей эквидистантной АР, имеющей такую же апертуру и такое же количество элементов, что и неэквидистантная АР. Из приведенных зависимостей видно, что использование неэквидистантной разреженной АР с конфигурацией, полученной с использованием предложенного метода, позволяет однозначно определять пеленг синфазной помехи, в отличие от разреженной эквидистантной АР. Для определения пеленга источника, как видно из зависимостей, простого фазирования АР становится недостаточно из-за интенсивного сигнала синфазной помехи. Для разрешения источника был применен один из известных адаптивных методов — метод MUSIC. Размерность сигнального подпространства в данном методе была равна двум, и она соответствовала количеству пространственно-когерентных источников сигнала. Соответствующие пеленгационные рельефы  $p_m$ , построенные с помощью MUSIC для рассмотренных на рис. 3а конфигураций разреженных АР, изображены на рис. 3б. Из представленных зависимостей видно, что неэквидистантная разреженная АР позволяет однозначно определить пеленги источника и синфазной помехи в отличие от эквидистантной АР. Стоит отметить, что метод MUSIC был выбран лишь как пример одного из адаптивных методов для пеленгации слабого источника на фоне интенсивного. Аналогичные результаты, демонстрирующие эффективность пеленгации слабого источника с использованием разреженных неэквидистантных АР, получаются, например, при применении метода Кейпона.



**Рис. 3.** Пеленгационные рельефы  $p_{d,m}$ , полученные с использованием фазирования АР (а) и метода MUSIC (б). Штрихпунктирной и сплошной жирной линиями обозначены результаты, полученные с использованием разреженной эквидистантной и разреженной неэквидистантной АР соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование стохастического синтеза разреженной неэквидистантной АР с учетом практического ограничения в виде минимального межэлементного расстояния, позволяющего существенно расширить рабочий частотный диапазон по сравнению с эквидистантной АР равной апертуры. Приведен пример реальной синтезированной и изготовленной в ИПФ РАН АР, для которой частотный диапазон был расширен в 5 раз. Проведено экспериментальное подтверждение возможности расширения частотного диапазона АР за счет использования неэквидистантности при пеленгации гидроакустических источников с помощью адаптивных методов.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме 0035-2014-0010 “Разработка физических основ акустических систем нового поколения” и при поддержке программы президиума РАН № 5 “Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.* Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2005. 410 с.
2. *Leahy R.M., Jeffs B.D.* // IEEE Trans. Ant. Prop. 1991. V. 39. № 8. P. 1178.
3. *Bucci O.M., D'Urso M., Isernia T. et al.* // IEEE Trans. Ant. Prop. 2010. V. 58. № 6. P. 1949.
4. *Lin C., Qing A., Feng Q.* // Int. J. Commun. Networks Inform. Security. 2009. V. 1. № 1. P. 20.
5. *Hong T., Song M.-Z., Sun X.-Y.* // Progr. Electromagn. Res. 2009. V. 98. P. 119.
6. *Турчин В.И., Родионов А.А.* // Изв. вузов. Радиофиз. 2018. Т. 61. № 2. С. 122; *Turchin V.I., Rodionov A.A.* // Radiophys. Quant. Electron. 2018. V. 61. № 2. P. 109.
7. *Фалькович С.Е.* Оценка параметров сигналов. М.: Сов. радио, 1970. 336 с.
8. *Бакут П.А., Богданович В.А. и др.* Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
9. *Трифонов А.П., Шинаков Ю.С.* Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.