

**ВЫБОР АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ ДЛЯ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СОДАРА**

Адаптивные антенные решетки (ААР), получившие широкое распространение в радиолокационных и связных системах, остаются предметом интенсивных исследований и разработок. Проявляемый к ним интерес обусловлен, главным образом, предоставляемой возможностью автоматически устанавливать нули диаграммы направленности (ДН) в направлениях на источники помех. Особый интерес вызывает использование ААР в акустических системах зондирования атмосферы (сонарах) [1], функционирующих, как правило, в местах с высоким уровнем внешних акустических помех, например в аэропортах. Низкие частоты зондирующих сигналов, используемые в этих локаторах, обуславливают простоту аппаратной реализации устройств обработки сигналов, и позволяют применять оптимальные алгоритмы формирования ДН с требуемыми свойствами.

В настоящее время известен ряд эффективных алгоритмов, которые, в принципе, могут быть использованы для управления свойствами ДН содара. В качестве критериев эффективности синтезируемых алгоритмов наиболее часто используются следующие: критерий минимума среднеквадратической ошибки, критерий максимума отношения сигнал-шум на выходе ААР, критерий максимума правдоподобия и критерий минимума дисперсии шума [2]. Проанализируем особенности известных алгоритмов и соответствующих им критериев эффективности с учетом особенностей работы содаров и определим наиболее подходящие из них, которые могут быть использованы при проектировании акустических локаторов, оснащенных антенными решетками.

Поле акустических помех и собственных шумов в раскрыте решетки содара представляет собой совокупность отсчетов случайных величин, состоящих из аддитивной смеси некоррелированной (обусловленной влиянием внутренних шумов элементов решетки) и коррелированной (обусловленной влиянием внешней помехи) составляющих. Суть процесса адаптации ААР заключается в формировании вектора весовых коэффициентов (ВВК)  $\vec{W}$  на основе оценки параметров коррелированной составляющей поля.

Вне зависимости от выбранного критерия оптимальности алгоритма (за исключением, пожалуй, критерия минимума дисперсии шума), оптимальный вектор весовых коэффициентов ААР вычисляется в виде решения уравнения Винера-Хопфа [2] и записывается с точностью до постоянного множителя как

$$\vec{W}_{opt} = \mu \hat{R}^{-1} \cdot B^*, \quad (1)$$

где  $\mu$  – комплексная константа, правила расчета которой, определяются выбранным критерием оптимальности алгоритма;  $\hat{R}$  – усредненная корреляционная матрица шумов,  $B$  – вектор управления (определяет форму ДН и направление главного максимума).

Однако реализация процесса вычисления  $\vec{W}_{opt}$  в (1) и статистические свойства оценок угловых направлений источников акустических помех в переходных режимах формирования ДН ААР могут иметь существенные различия при использовании различных алгоритмов. В частности, хотя в содаре направление прихода полезного сигнала заранее известно, применение алгоритмов, работающих по критериям минимума среднего квадрата ошибок и минимума дисперсии шума, затруднено, так как ожидаемый полезный сигнал нельзя адекватно представить моделью детерминированного опорного сигнала вследствие флуктуационного характера рассеянной неоднородностями атмосферы акустической волны.

Адаптивное формирование ДН по критерию максимума отношения сигнал-шум на выходе ААР при реализации алгоритма непосредственного обращения корреляционной матрицы  $\hat{R}$  выполняется в предположении малости или отсутствия полезного сигнала. Следовательно, этот алгоритм оказывается практически инвариантным к статистическим свойствам эхо-сигнала, и его применение для пространственно-временной обработки сигналов в содаре может быть весьма эффективным. Рассмотрим подробнее свойства этого алгоритма. Монохроматическая плоская волна с частотой  $f$ , падающая на решетку под углом  $\theta$ , после пространственной дискретизации с интервалом  $d$  на апертуре решетки длиной  $N \cdot d$  будет иметь вид  $A \exp(j(2\pi d/\lambda) \cdot (n-1) \cdot \sin(\theta))$ ,  $n \in 1..N$  [3], где  $A$  – амплитуда ко-

лебаний;  $N$  – количество элементов ААР;  $d$  – расстояние между элементами ААР;  $\lambda$  – длина волны сигнала (определяет настройку входных контуров элементов решётки).

Для узкополосной внешней помехи распределение мгновенных значений напряжений на выходах элементов ААР определяется вектором  $\dot{X}_n$  помехи

$$\dot{X}_n = A_n \cdot e^{j \left[ \frac{2\pi \cdot d}{\lambda} (n-1) \cdot \sin(\theta_p) + \varphi_n \right]} + \eta_n, \quad n \in 1..N, \quad (2)$$

где  $A_n, \varphi_n$  – распределенная по закону Релея амплитуда и равномерно распределенная фаза внешней помехи;  $\theta_p$  – направление прихода внешней помехи;  $\eta_n$  – некоррелированная составляющая мгновенных значений напряжений в элементах решётки, обусловленная тепловыми шумами.

Корреляционная матрица помех, определяющая коэффициенты корреляции между сигналами элементов решётки, формируется следующим образом:  $\dot{R} = \dot{X} \cdot \dot{X}^{*T}$ . Элементы усредненной корреляционной матрицы  $\hat{R}_{i,j}$  находятся как средние значения соответствующих элементов набора из  $m \in 1..M$  корреляционных матриц

$$\hat{R}_{i,j} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \dot{R}_{i,j,(m)}. \quad (3)$$

В процессе проектирования ААР разработчику приходится принимать множество компромиссных решений, направленных на получение по конечному количеству циклов усреднения  $M$  статистически устойчивых пространственно-временных оценок угловых положений источников акустических помех с максимально возможным разрешением. Для применения обоснованных решений необходимо иметь соответствующую информацию о свойствах алгоритма. В соответствии с этим исследуем скорость сходимости алгоритма непосредственного обращения матрицы (НОМ), свойства оценок в переходных режимах, а также влияние функций окна для взвешивания данных в пределах апертуры решетки. Эффективность алгоритма будем оценивать коэффициентом ослабления помехи

$$\delta = \frac{G_a(\theta_p)}{G_a(\theta_s)}, \quad (4)$$

где  $G_a(\theta_p), G_a(\theta_s)$  – уровни адаптированной ДН в направлениях помехи и главного максимума соответственно;  $\delta$  представляет собой уровень в направлении помехи нормированной и адаптированной ДН.

Для адекватного представления работы антенны содара в процессе адаптации, в отличие от широко известных моделей, использующих феноменологический подход, ДН сформируем из отсчетов внутренних шумов антенны, взятых одновременно во всех приемных элементах решетки. Тогда результирующая диаграмма направленности будет представлена функцией, содержащей наряду с детерминированной компонентой и флуктуационный член. Это приведет к изменению формы ДН по мере увеличения интервала накопления и обеспечит достоверность получаемых результатов.

В качестве модели внутреннего шума антенны принята нормально распределенная случайная величина  $\eta_n$

$$\eta_n = \xi_n e^{j\psi_n}, \quad (5)$$

где  $\xi_n$  – огибающая, распределенная по закону Рэлея со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_\eta$ ,  $\psi_n$  – фаза, равномерно распределенная на интервале от  $-\pi$  до  $\pi$ .

Поскольку матрица  $\hat{R}$ , определяющая в соответствии с (1) вектор весовых коэффициентов и адаптированную ДН, зависит от количества усреднений  $m$ , то в качестве характеристики, описывающей переходные процессы алгоритма НОМ, можно использовать следующую зависимость:  $\delta(m)$ . Учитывая, что пространственно-временные характеристики внешней помехи входят в выражения ал-

горитма адаптации в виде отношения  $d/\lambda$ , можно достаточно просто перейти от количества усреднений  $M_0$  корреляционной матрицы, необходимого для получения заданного коэффициента ослабления помехи  $\delta_0$ , ко времени сходимости алгоритма  $t_{сх} = M_0 \cdot \Delta t$ , где  $\Delta t$  – период дискретизации входного сигнала.

По результатам моделирования сравниваются характеристики ААР с равномерным взвешиванием сигналов элементов и характеристики решетки, обеспечивающей взвешивание сигналов элементов в пределах апертуры функцией окна Хэмминга. Исходные данные модельного эксперимента приведены в табл. 1.

Количество элементов решетки	7
Отношение размера $d$ к длине волны $\lambda$	0,5
Отношение уровня внешней помехи к уровню внутреннего шума, дБ.	34
Направление максимума ДН, град	0
Направление прихода исследуемой помехи $\theta_p$ , град	20

Уровень боковых лепестков неадаптированной диаграммы направленности при учете внутренних шумов зависит от количества усреднений  $m$  корреляционной матрицы. На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости уровня неадаптированной и нормированной ДН  $G_H(\theta_p)$  в направлении помехи  $\theta_p = 20^0$  от количества усреднений  $m$ , где кривая 1 соответствует равномерному окну, кривая 2 – окну Хэмминга.

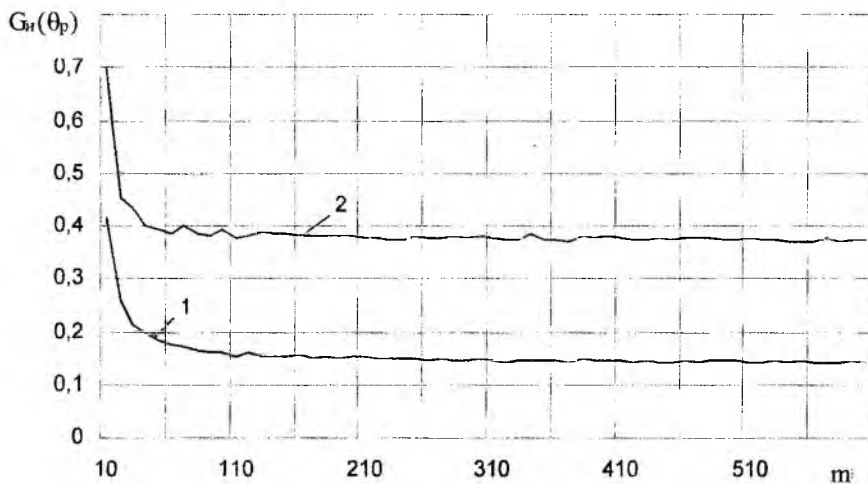


Рис. 1

Рис. 1 дает представление об ослаблении помехи без применения адаптивных алгоритмов, при этом уровень ДН, как видно из рисунка, для случая взвешивания сигналов функцией Хемминга получается несколько выше за счет увеличения ширины главного лепестка.

С целью оценки влияния помеховой обстановки на скорость адаптации алгоритма исследовалась динамика ослабления помехи в направлении  $\theta_p = 20^0$  при воздействии различного количества источников внешних помех. Максимальное число помех  $k$ , обрабатываемых алгоритмом, зависит, как известно, от количества элементов акустической решётки  $k = N - 1$ , для данного случая  $k=6$ . Моделировавшиеся варианты помеховой обстановки приведены в табл. 2, мощности всех помех одинаковы и составляют 34 дБ по отношению к мощности внутреннего шума акустической решётки.

Кол-во помех	Направление помехи, град					
	20	30	40	50	60	70
1	+					
2	+	+				
3	+	+	+			
4	+	+	+	+		
5	+	+	+	+	+	
6	+	+	+	+	+	+

Результаты моделирования представлены на рис. 2 и рис. 3 в виде кривых, аппроксимирующих экспериментальные данные. Для аппроксимации использовалась степенная функция вида  $y = a \cdot x^b$ , характеризующаяся показателем достоверности  $r^2$ . Вычисления осуществлялись с использованием стандартных процедур и функций среды Microsoft Excel 97. Параметры аппроксимирующих кривых для различных видов взвешивания и различной помеховой обстановки сведены в табл. 3.

Таблица 3

Кол-во помех	Прямоугольное окно					
	Среднее значение			СКО		
	a	b	$r^2$	a	b	$r^2$
1	0,0024	-0,5367	0,9893	0,0013	-0,5475	0,9641
4	0,0027	-0,5384	0,9821	0,0014	-0,537	0,9679
5	0,0027	-0,4637	0,9627	0,0015	-0,4843	0,955
6	0,0027	-0,4145	0,9479	0,0017	-0,49	0,9539
	Окно Хемминга					
	Среднее значение			СКО		
	a	b	$r^2$	a	b	$r^2$
1	0,0026	-0,5272	0,9888	-0,5399	0,0014	0,9721
2	0,0028	-0,5543	0,9884	-0,5579	0,0015	0,9787
6	0,0026	-0,4641	0,9707	-0,5034	0,0015	0,9666

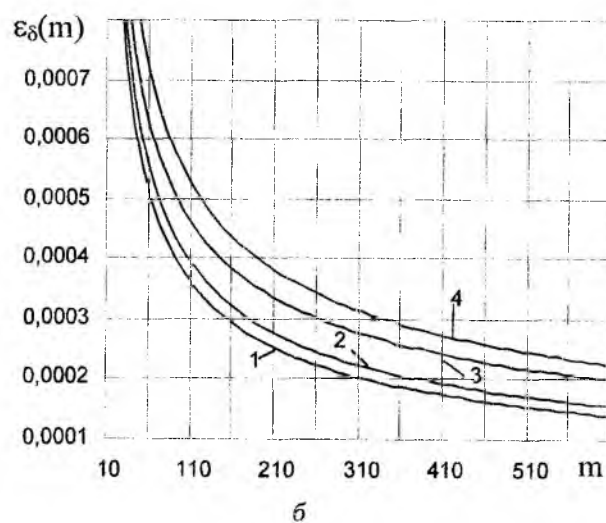
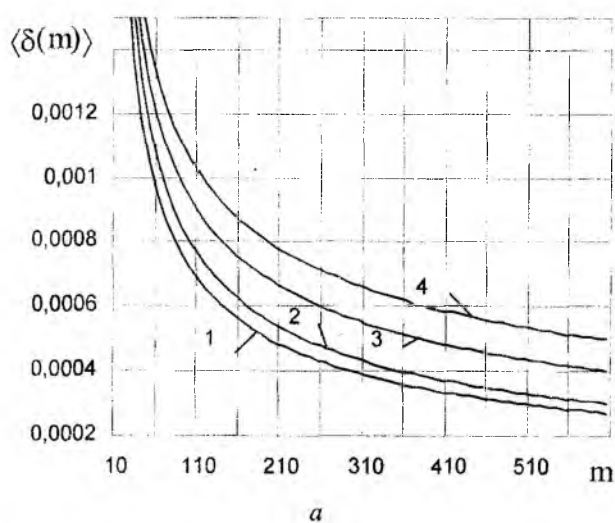


Рис. 2

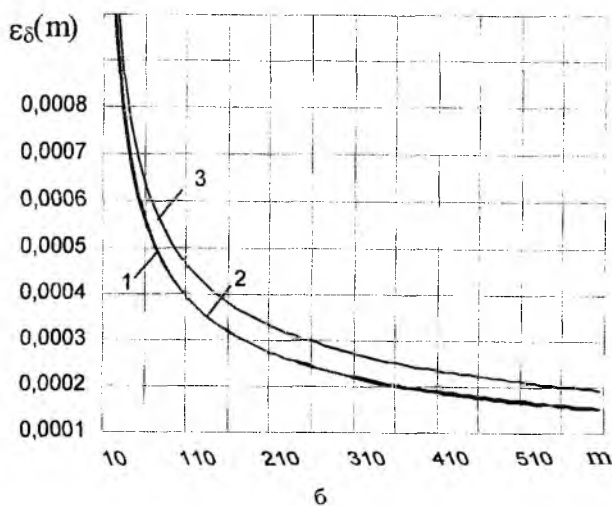
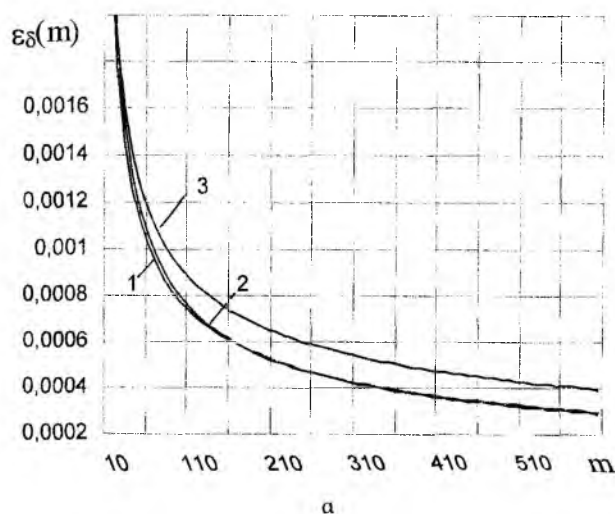


Рис. 3

Рис. 2, а и 3, а отображают зависимости среднего значения  $\langle \delta \rangle$  от количества усреднений  $m$  для прямоугольного окна (рис. 2, а) и для окна Хэмминга (рис. 3, а), рис. 2, б и 3, б — зависимости среднеквадратичного отклонения  $\epsilon_\delta$  от числа  $m$  также для прямоугольного окна (рис. 2, б) и окна Хэмминга (рис. 3, б).

На рис. 2, а, б кривая 1 соответствует воздействию одной помехи; кривая 2 — четырех помех; 3 — пяти; 4 — шести помех. На рис.3а, 3б кривая 1 была получена при воздействии одной помехи; 2 — двух; 3 — шести помех.

Согласно рис. 2 и 3, величина подавления зависит не только от количества усреднений, но и от конкретной помеховой обстановки. В случае действия от одной до трёх помех характер спада зависимости коэффициента ослабления практически не изменяется, поэтому кривые для двух и трёх помех не приводятся. С увеличением количества помех, принимаемых содаром, скорость убывания зависимости  $\langle \delta(m) \rangle$  уменьшается, а время сходимости алгоритма увеличивается.

Важной характеристикой, описывающей свойства алгоритма, является ошибка  $\alpha$  положения провала диаграммы направленности.

На рис. 4 показаны экспериментально полученные характеристики ошибки положения  $\alpha$  (среднее значение и среднеквадратичное отклонение) для двух моделей решётки. Исходные данные моделирования остаются прежними.

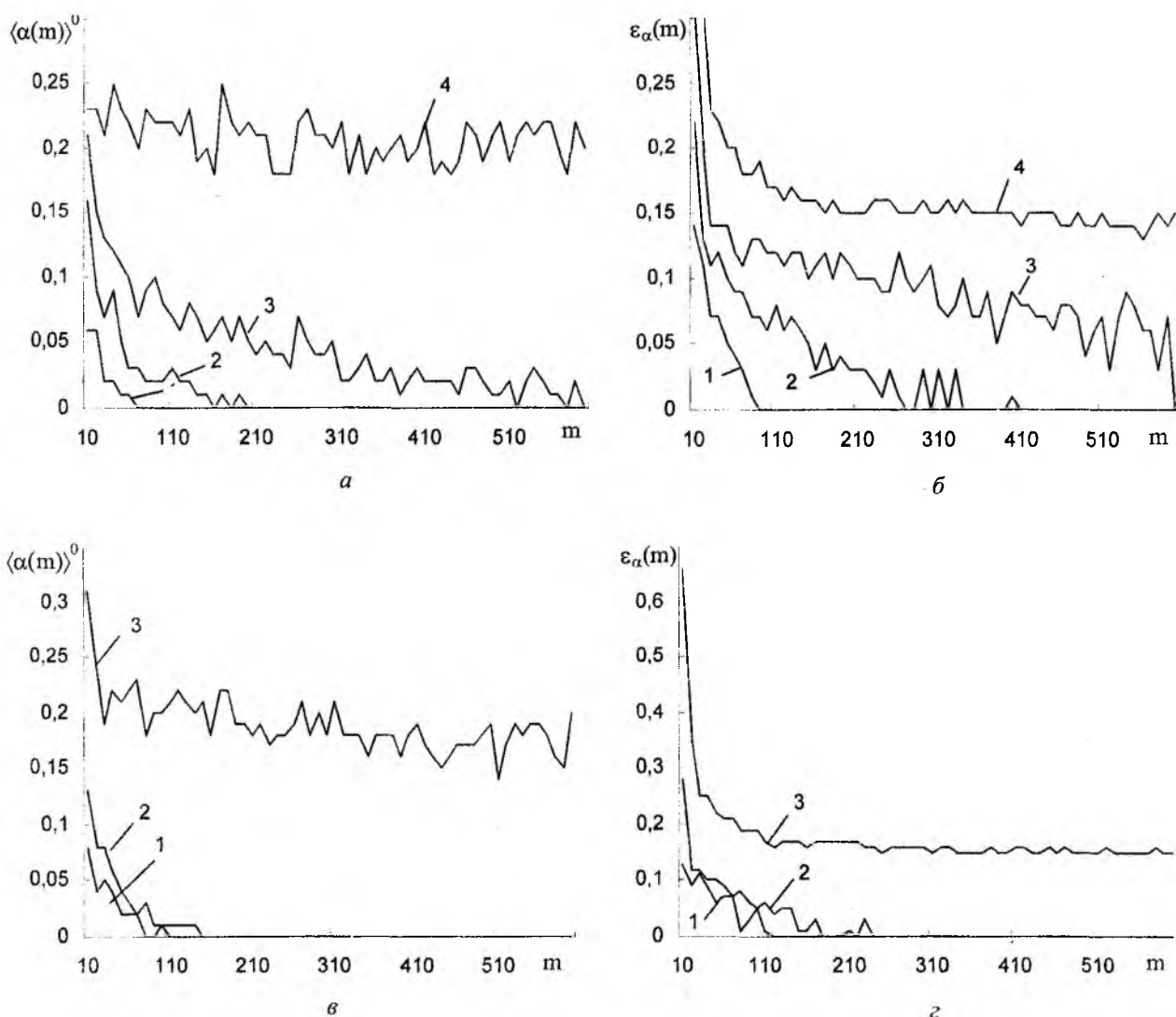


Рис. 4

Рис. 4, а, в отображают зависимости среднего значения  $\langle \alpha \rangle$  в градусах от количества усреднений  $m$  для прямоугольного окна (рис. 4, а) и для окна Хэмминга (рис. 4, в), рис. 4, б, г — зависимости среднеквадратичного отклонения  $\epsilon_\alpha$  в зависимости от числа  $m$  также для прямоугольного окна (рис. 4, б) и окна Хэмминга (рис. 4, г).

На рис. 4, а, б кривая 1 соответствует воздействию одной помехи; кривая 2 — четырех помех; 3 — пяти; 4 — шести помех. На рис. 4, в, г кривая 1 была получена при воздействии одной помехи; 2 — двух; 3 — шести помех.

При воздействии одной помехи среднее значение ошибки  $\alpha$  резко убывает с ростом количества усреднений, и при некотором значении  $m$  становится равным нулю (рис. 4, а). С увеличением количества помех скорость убывания зависимости средней ошибки положения от числа усреднений уменьшается. Вследствие того, что подавление помехи реализуется в достаточно узком секторе направлений, даже небольшая ошибка в положении провала приводит к резкому ухудшению подавления. Это в некоторой степени обуславливает характер кривых 3, 4 на рис. 2, а и их отличие от кривой 1 на рис. 2, а.

В ходе моделирования установлено, что статистические характеристики ошибок положения провала зависят исключительно от конкретной помеховой обстановки, в которой работает содар: они существенно зависят от количества действующих источников помех и взаимного расположения их по направлениям. Так, при воздействии шести помех уменьшение угла между соседними источниками приводит к увеличению ошибки положения. На рис. 5 показаны зависимости коэффициента подавления помехи  $K_n$  от направления  $\theta$  определяемого как

$$K_n(\theta) = \frac{G(\theta)}{G_a(\theta)}, \quad (6)$$

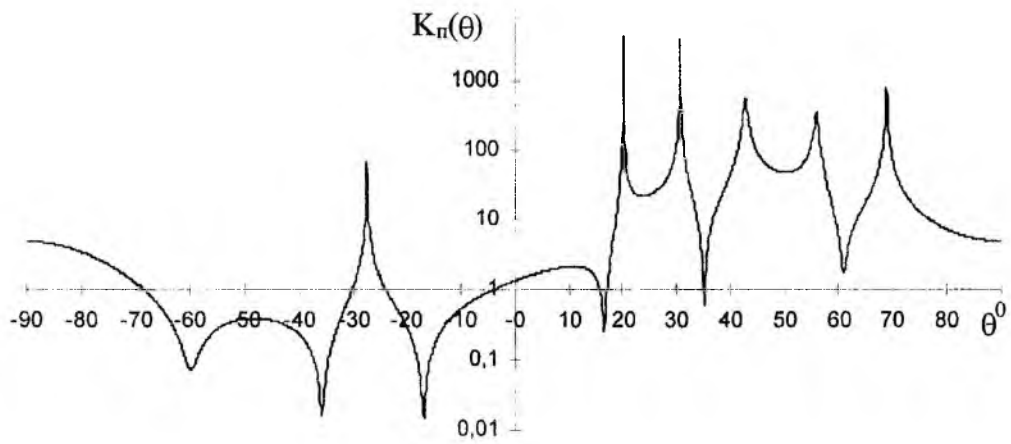
где  $G(\theta)$  — уровень неадаптированной ДН от направления  $\theta$  при различных условиях.

Коэффициент  $K_n(\theta)$  показывает, во сколько раз сильнее ослабляет помеху, приходящую с направления  $\theta$ , адаптированная диаграмма направленности по сравнению с неадаптированной ДН.

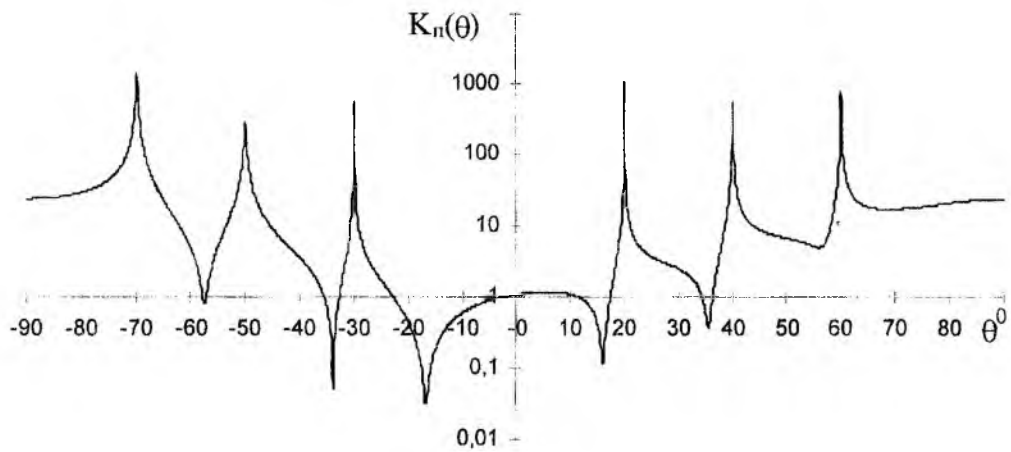
Зависимости  $K_n(\theta)$  получены при воздействии максимального для данной решетки количества помех. На рис. 5, а источники помех расположены на направлениях 20, 30, 40, 50, 60, 70 градусов, при этом провалы ДН в направлениях 40, 50 и 60 градусов формируются с большими ошибками положения, что приводит к значительному снижению эффективности подавления. В случае, когда помехи разнесены достаточно широко по направлениям (20, -30, 40, -50, 60, -70 градусов), провалы диаграммы направленности формируются с достаточной точностью (этой ситуации соответствует рис. 5, б).

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что для рассматриваемых окон взвешивания, адаптация методом непосредственного обращения корреляционной матрицы осуществляется с практически одинаковыми показателями.

В процессе проектирования акустических локаторов, предназначенных для работы в условиях сложной помеховой обстановки, необходимо учитывать конкретное расположение содара и наиболее вероятные условия его работы. Количество элементов решетки содара следует выбирать не только из условия обеспечения требуемой ширины ДН, но также и из условия подавления максимально возможного количества помех. Причем для эффективного подавления помех требуется их четкое пространственное (угловое) разрешение. Время сходимости алгоритма для различных помеховых условий может быть определено, используя приведенные зависимости, по формуле  $t_c = M_0 \Delta t$ . Период дискретизации  $\Delta t$  следует выбирать, исходя из неравенства  $2c/\lambda \geq \Delta t \geq \tau_\eta$ , где  $c$  — скорость звука,  $\tau_\eta$  — время корреляции случайной компоненты поля, обусловленной тепловыми шумами элементов решетки.



a



б

Рис. 5

**Список литературы:** 1. Ito J. Wind measurements using five-beam phased array Doppler sodar // Proc. 9 Int. Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere. 1996. P. 3.1-3.6. 2. Монзинго P.A. Миллер T.Y. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с. 3. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 15.02.2001