Tom XXVIII

1982

Вып. 1

УДК 537.874.1

## НАПРАВЛЕННОСТЬ СИСТЕМЫ КОМПЕНСИРОВАННЫХ КОЛЕЦ В ПРИСУТСТВИИ АКУСТИЧЕСКИ МЯГКОЙ СФЕРЫ

Карновский М. И., Некрасов В. А., Пугач В. П.

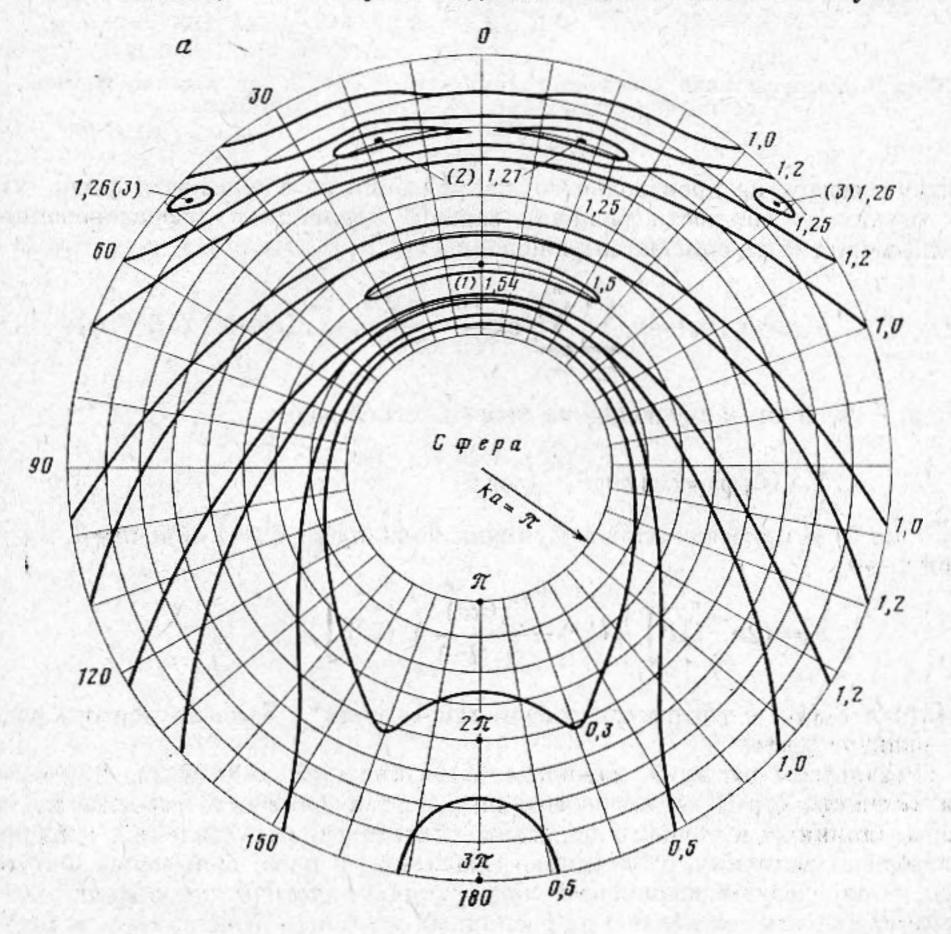
Рассмотрена направленность акустических антенн, составленных из соосных приемных колец, расположенных в областях максимальных давлений, возникающих при дифракции плоской волны на акустически мягкой сфере.

В результате дифракции плоской волны на акустически мягкой сфере в непосредственной близости от нее возникают области повышенного давления, максимумы которых представляют собой концентрические окружности (либо точки), лежащие на различных расстояниях от сферы в плоскостях, перпендикулярных направлению прихода волны.

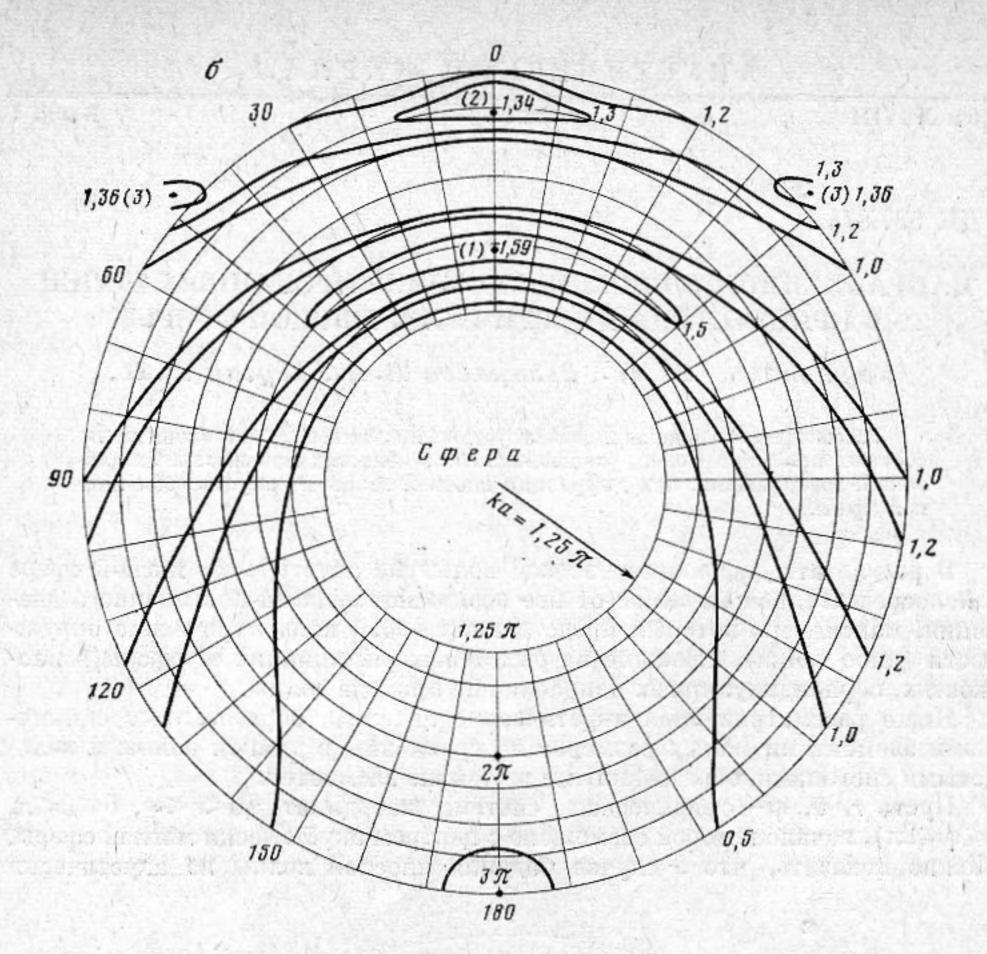
Ниже рассматриваются акустические антенны, образованные единичными элементами малых размеров по сравнению с длиной волны и коль-

цевыми системами, образованными из тех же элементов.

Пусть r,  $\vartheta$ ,  $\varphi$  — сферическая система координат ( $0 < r < \infty$ ,  $0 \le \vartheta \le \pi$ ,  $0 \le \varphi \le 2\pi$ ), начало которой совмещено с центром акустически мягкой сферы. Можно показать, что в случае падения плоской волны на акустически



Фиг. 1 (а)



Фиг. 1. Распределение давлений вблизи мягкой сферы при падении плоской волны под углом  $\vartheta_0$ =0. a-ka= $\pi$ ;  $\delta-ka$ =1,25 $\pi$ 

мягкую сферу из произвольного направления Ф<sub>0</sub> в плоскости ф<sub>0</sub>=0 (что не ограничит общности решения задачи) давление в дифрагированной волне может быть описано выражением [1]

(1) 
$$p(r,\vartheta,\varphi,\vartheta_0) = p_i \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{n} \varepsilon_m \frac{(n-m)!}{(n+m)!} b_n p_{(n)}^{(m)}(\cos\vartheta_0) Y_{nm}(\vartheta,\varphi),$$

где p<sub>i</sub> — давление в падающей на сферу плоской волне,

$$Y_{nm}(\vartheta, \varphi) = \cos m\varphi P_n^{(m)}(\cos \vartheta),$$

 $P_n^{(m)}(\cos\vartheta)$  — присоединенная функция Лежандра,  $\varepsilon_m=1$  при m=0,  $\varepsilon_m=2$  при  $m\neq 0$ ,

$$b_n = (2n+1)i^n \left[ j_n(kr) - \frac{j_n(ka)}{h_n(ka)} h_n(kr) \right],$$

 $j_n(kr)$  и  $h_n(kr)$  — сферические функции Бесселя и Ганкеля первого рода,

а - радиус сферы.

Результаты расчетов давления (1) в ближней зоне сферы при  $\vartheta_0$ =0 для ka= $\pi$  и ka=1,25 $\pi$  приведены на фиг. 1, a и b соответственно, на которых линиями и точками показаны области равных давлений, а цифры указывают величину, отнесенную к давлению в падающей волне. Фигуры 1, a, b определяют возможные конструкции акустических антенн, которые могут быть составлены из различных комбинаций кольцевых и точечных приемных элементов, показанных на фиг. 2 для ka= $\pi$ .

Определим выражение диаграммы направленности антенны, составленной из произвольного числа кольцевых и точечных приемных элементов. Для этого определим чувст-

вительность системы в виде

$$\gamma = u/p_i$$

где *и* — напряжение, развиваемое на выходе сумматора системы.

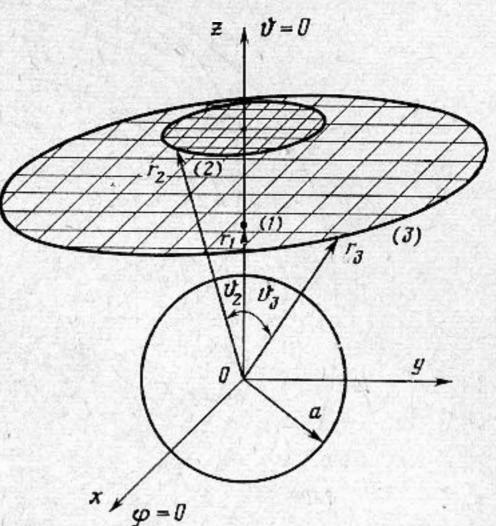
Напряжение на выходе v-го точечного элемента антенны

(2) 
$$u_{\nu}(\vartheta_0) = \gamma_{\nu} p_{\nu}(\vartheta_0)$$

и на выходе µ-го кольцевого элемента

(3) 
$$u_{\mu}(\vartheta_{0}) = \int_{L_{\mu}} \gamma_{\mu}(l_{\mu}) p_{\mu} \times (l_{\mu}, \vartheta_{0}) dl_{\mu},$$

где  $\gamma_{\nu}$  и  $\gamma_{\mu}(l_{\mu})$  — соответственно чувствительность  $\nu$ -го точечного элемента и функция распределения плотности чувствительности  $\mu$ -го кольцевого элемента системы длиной  $L_{\mu}$  в точке  $l_{\mu}$ , а  $p_{\nu}(\vartheta_{0})$  и



Фиг. 2. Расположение точечной 1 и кольцевых 2 и 3 приемных систем в зонах максимального давления при  $ka=\pi$ 

 $p_{\mu}(l_{\mu}\vartheta_{0})$  — распределения давлений (1) в областях расположения v-го точечного и  $\mu$ -го кольцевого элементов антенны при падении плоской волны из направления  $\vartheta_{0}$ .

 $\Pi$ ри этом диаграмма направленности антенны, состоящей из N точек

и М колец, может быть представлена в виде

(4) 
$$S(\vartheta_0) = \frac{1}{\xi} \left[ \sum_{\nu=1}^{N} u_{\nu}(\vartheta_0) + \sum_{\mu=1}^{M} u_{\mu}(\vartheta_0) \right],$$

где § — нормирующая постоянная.

Подставляя в формулу (4) значения (2) и (3) с учетом (1), получаем

$$S(\vartheta_0) = \frac{1}{\xi} \left[ \sum_{\nu=1}^{N} \gamma_{\nu} \sum_{n=0}^{\infty} b_n^{\nu} P_n(\cos \vartheta_0) + \sum_{\mu=1}^{M} r_{\mu} \sin \vartheta_{\mu} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{n} \epsilon_m \frac{(n-m)!}{(n+m)!} b_n^{\mu} P_n^{(m)}(\cos \vartheta_{\mu}) \times I_m^{\mu} P_n^{(m)}(\cos \vartheta_0) \right],$$

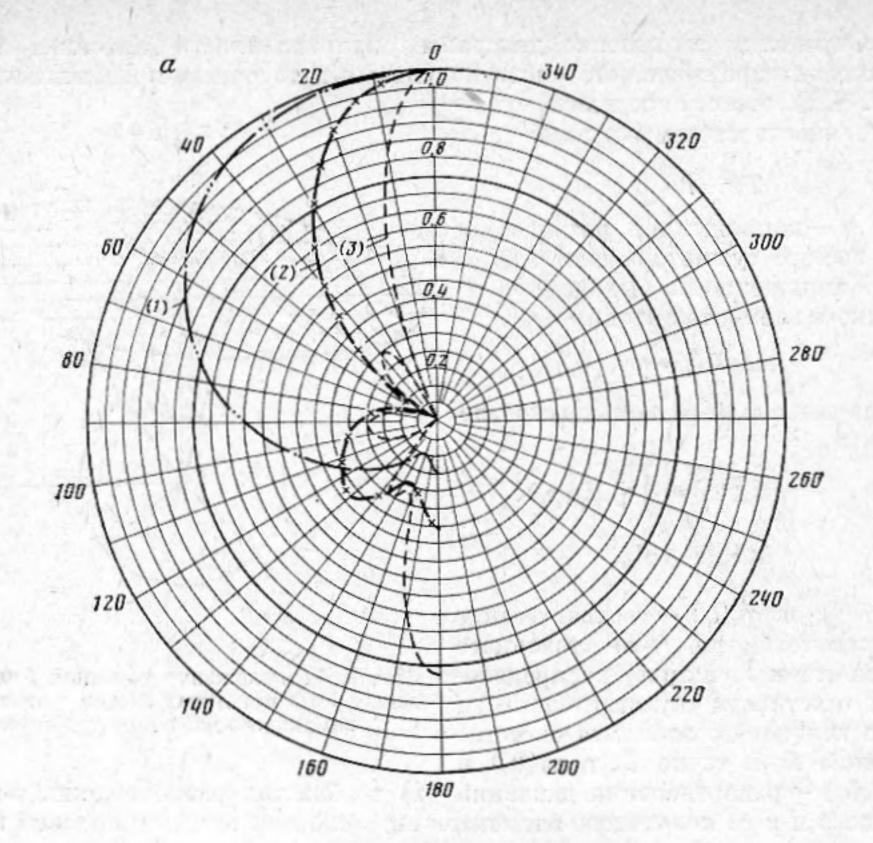
где  $P_n(\cos \theta_0)$  — полином Лежандра,

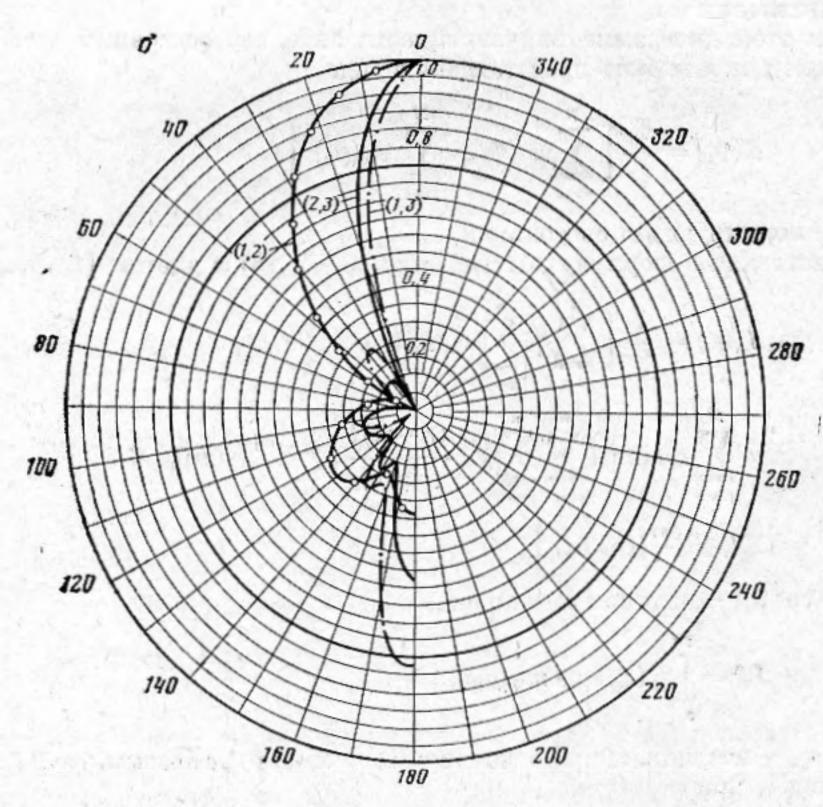
$$I_{m}^{\mu} = \int_{a}^{2\pi} \gamma_{\mu}(\varphi_{\mu}) \cos m \varphi_{\mu} d\varphi_{\mu},$$

 $r_{\mu}$ ,  $\vartheta_{\mu}$ ,  $\varphi_{\mu}$  — координаты  $\mu$ -го кольцевого элемента антенны, а  $b_n^{\ \nu}(b_n^{\ \mu})$  — значения  $b_n$  при  $r=r_{\nu}(r=r_{\mu})$ .

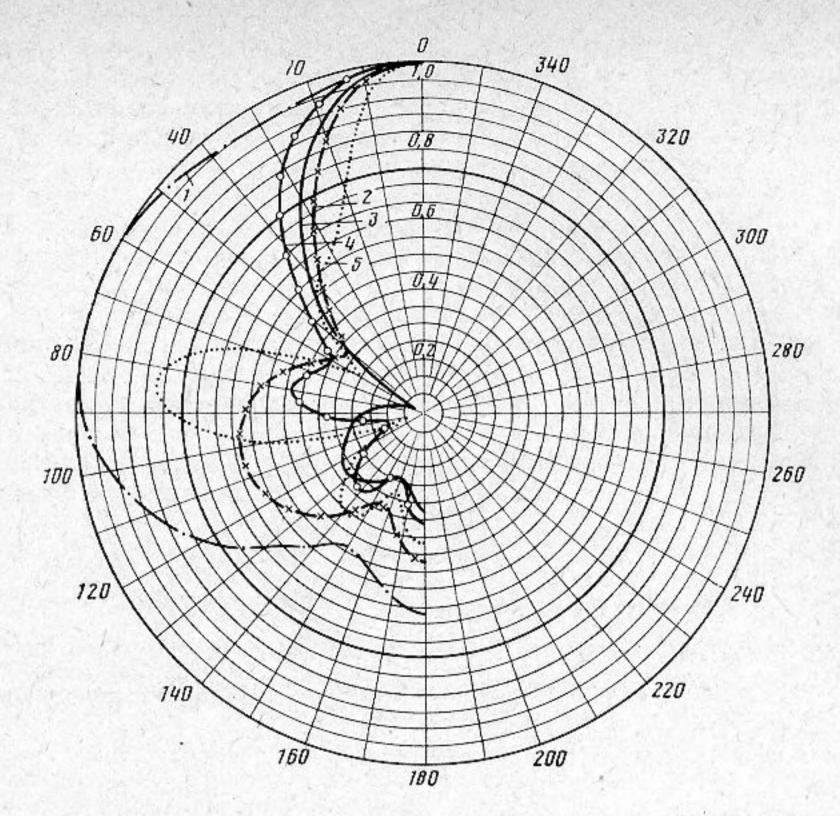
В частном случае, когда  $\gamma_{\mu}(\varphi_{\mu}) = \gamma_{\mu}$ , получаем  $I_m{}^{\mu} = 2\pi\gamma_{\mu}$  при m = 0 и  $I_m{}^{\mu} = 0$  при  $m \neq 0$ , в силу чего

(5) 
$$S(\theta_0) = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \sum_{\nu=1}^N \gamma_{\nu} \sum_{n=0}^{\infty} b_n^{\nu} P_n(\cos \theta_0) + \right]$$





Фиг. 3. Диаграммы направленности различных приемных систем. 1— точечный приемный элемент; 2 и 3—кольцевые приемные элементы; 1, 2; 1, 3; 2, 3—комбинации точечных и кольцевых приемных элементов



Фиг. 4. Диаграммы направленности системы 1, 2 для различных значений  $\alpha$ .  $1-\alpha=0.6$ ;  $2-\alpha=0.8$ ;  $3-\alpha=1$ ;  $4-\alpha=1.2$ ;  $5-\alpha=1.4$ 

$$+2\pi\sum_{n=1}^{M}\gamma_{\mu}r_{\mu}\sin\vartheta_{\mu}\sum_{n=0}^{\infty}b_{n}^{\mu}P_{n}(\cos\vartheta_{\mu})P_{n}(\cos\vartheta_{0})\Big].$$

При этом коэффициент концентрации антенны

(6) 
$$\Omega = \left| \sum_{v=0}^{\infty} D_n \right|^2 / \sum_{n=0}^{\infty} |D_n|^2 / (2n+1),$$

где

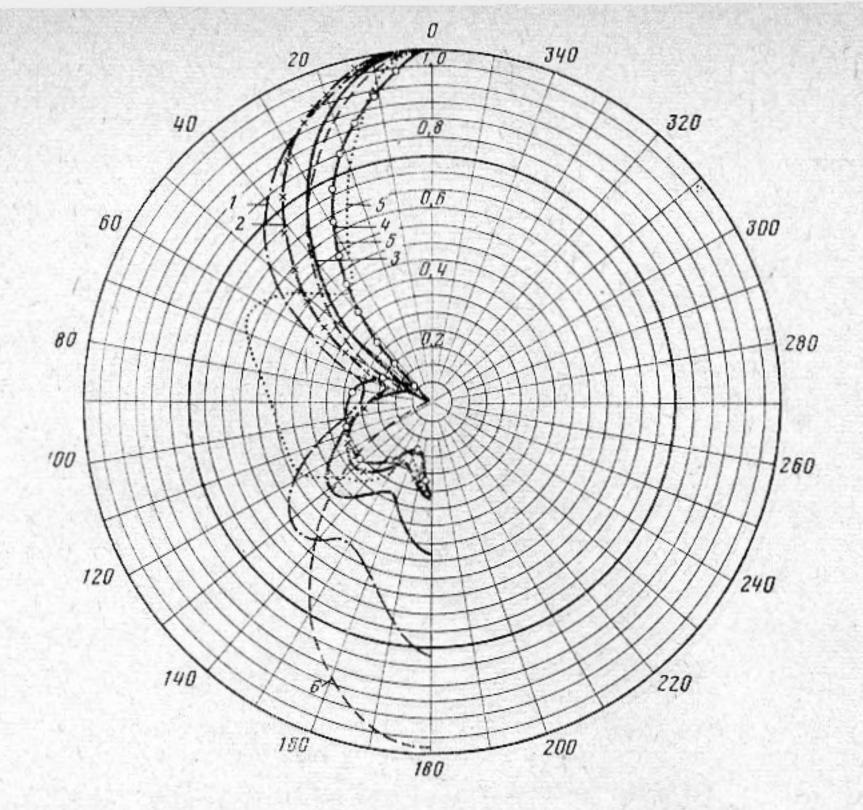
$$D_n = \sum_{\nu=1}^N \gamma_{\nu} b_n^{\nu} + \sum_{\mu=1}^M \gamma_{\mu} r_{\mu} \sin \vartheta_{\mu} b_n^{\mu} P_n (\cos \vartheta_{\mu}),$$

и чувствительность антенны в направлении  $\vartheta_0$ =0

(7) 
$$\gamma = \left[ \sum_{\nu=1}^{N} \gamma_{\nu} \sum_{n=0}^{\infty} b_{n}^{\nu} + 2\pi \sum_{\mu=1}^{M} \gamma_{\mu} r_{\mu} \sin \vartheta_{\mu} \sum_{n=0}^{\infty} b_{n}^{\mu} P_{n} (\cos \vartheta_{\mu}) \right].$$

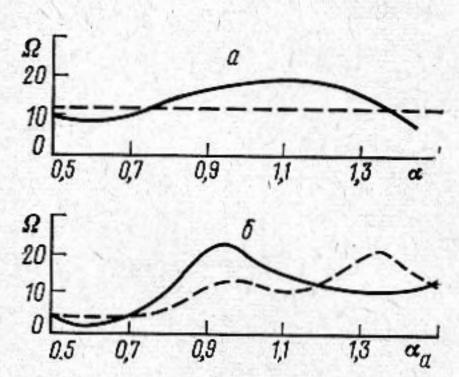
Ниже приводятся некоторые результаты расчетов диаграмм направленности, коэффициентов концентрации и чувствительности рассматриваемых антенн для  $\gamma_{\nu} = \gamma_{\mu} = 1$ .

На фиг. 3, а, б приводятся диаграммы направленности (5) антенн, составленных из различных возможных комбинаций чувствительных эле-

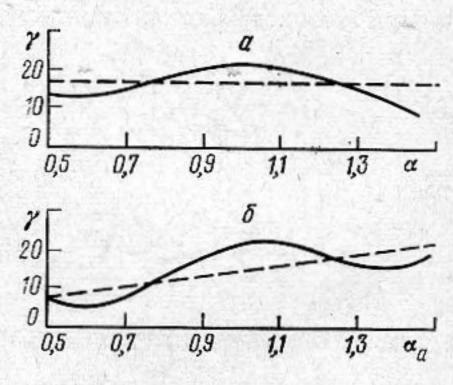


Фиг. 5. Диаграммы направленности системы 1, 2 для различных значений  $\alpha_a$ :  $1-\alpha_a=0.6$ ;  $2-\alpha_a=0.8$ ;  $3-\alpha_a=1$ ;  $4-\alpha_a=1.2$ ;  $5-\alpha_a=1.4$ ;  $6-\alpha_a=0$ 

ментов (1), (2), (3), (1, 2), (1, 3), (2, 3), показанных на фиг. 2. Как следует из фиг. 3, a, b, более узким лепестком диаграммы направленности обладают антенны, содержащие большие чувствительные кольца. Однако при этом наблюдаются большие тыльные лепестки, снижение кото-



Фиг. 6. Коэффициент концентрации системы 1, 2 в зависимости от:  $a - \alpha$ ;  $6 - \alpha_a$ 



Фиг. 7. Чувствительность системы 1, 2 в зависимости от:  $a - \alpha$ ;  $\delta - \alpha_a$ 

рых может быть достигнуто использованием комбинаций различных чувствительных элементов.

Диаграммы направленности приемной антенны (1, 2) (фиг. 2) для разных значений  $\alpha = ka/\pi$  приведены на фиг. 4. При этом предполагалось, что с изменением волнового радиуса сферы ka пропорционально изменялись и все остальные волновые размеры антенны. На фиг. 5 приведены значения диаграмм направленности при различных значениях  $\alpha_a = ka/\pi$ , однако в отличие от фиг. 4 в этом случае происходит лишь изменение волнового радиуса сферы ka при неизменных других волновых размерах

и положении приемной антенны. Там же для сравнения приведена диаграмма направленности антенны, составленной из компенсированной пары чувствительных элементов (1, 2) в отсутствие сферы, соответствующей на фигуре α<sub>α</sub>=0. Изменение волновых размеров акустически мягкой сферы дает некоторую возможность управления диаграммой направленности антенны.

На фиг. 6, а, б и 7, а, б непрерывными линиями показаны изменения коэффициентов концентрации (6) и чувствительности (7) антенны, составленной из комбинации 1-го и 2-го чувствительных элементов в зависимости от α и α соответственно. Там же для сравнения штриховыми линиями показаны изменения аналогичных величин для антенны, состоящей из этих же элементов без сферы. Как следует из фиг. 6 и 7, рассматриваемые антенны обладают большими коэффициентами концентрации и значениями чувствительности в относительно широком диапазоне принимаемых частот и размеров сферы по сравнению с аналогичными антеннами в отсутствие сфер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: изд-во МГУ, 1960.

Киевский политехнический институт им. 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции Поступила в редакцию 31.X.1980