АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIX 1983 Вып. 1

УДК 621.396.677

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛОСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ПОСЛЕДНИХ

Смарышев М. Д.

Рассмотрено влияние периодической неидентичности характеристик направленности отдельных элементов плоских акустических антенн на характеристики направленности последних в двух случаях неоднородностей на антенне, период которых в 2 или 3 раза превышает период расположения элементов.

В реальных конструкциях акустических излучающих антенн наблюдается неидентичность характеристик направленности их элементов, причем в ряде случаев эта неидентичность вызывается особенностями конструкции антенны или устройств, находящихся вблизи нее. Рассмотрим два простейших случая наличия периодических неоднородностей, приводящих к искажению характеристик направленности элементов антенн.

Пусть в первом случае характеристики направленности всех нечетных элементов $D_н(\alpha)$ одинаковы и связаны с характеристиками четных элементов $D_ч(\alpha)$ соотношением $D_н(\alpha)=D_ч(-\alpha)$. Очевидно, справедливы равенства $D_ч(\alpha)=D_э(\alpha)+D'(\alpha)$ и $D_н(\alpha)=D_э(\alpha)-D'(\alpha)$, где $D_э(\alpha)$ и $D'(\alpha)$ — некоторые функции угла α, причем $D_э(\alpha)=D_э(-\alpha)$, а $D'(\alpha)=-D'(-\alpha)$. Справедливы соотношения $D_э(\alpha)=0{,}5[(D_ч(\alpha)+D_н(a)]$ и $D'(\alpha)=0{,}5[(D_ч(\alpha)-D_н(\alpha)]$, откуда следует, что функция $D'(\alpha)$ определяет степень отличия $D_ч(\alpha)$ от $D_н(\alpha)$, и поэтому ее можно назвать характеристикой отличия, в случае $D'(\alpha)=0$ выполняется равенство $D_ч(\alpha)=D_н(\alpha)=D_э(\alpha)$; таким образом, $D_э(\alpha)$ —характеристика направленности элемента антенны при отсутствии действия искажающих факторов.

Пусть число элементов антенны N четно, тогда, группируя элементы в пары и рассматривая исходную антенну, как состоящую из $N/2$ пар элементов, каждая из которых содержит нечетный и четный элементы, в соответствии с теоремой умножения характеристику направленности всей антенны $D(\alpha)$ можно написать в виде

$$D(\alpha)=\frac{\sin\left[\frac{\pi dN}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]}{\frac{N}{2}\sin\left[\frac{2\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]}\times 0{,}5\,[D_н'(\alpha)e^{ik\frac{d}{2}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)}+$$
$$+D_ч(\alpha)e^{-ik\frac{d}{2}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)}].$$

В этом выражении α_0 — угол компенсации, слагаемые $ik\frac{d}{2}\sin\alpha$ и $-ik\frac{d}{2}\sin\alpha$ в показателе экспонент записаны для переноса начала координат из центров элементов в точку, расположенную в центре пары элементов.

Выражая $D_н(\alpha)$ и $D_ч(\alpha)$ через $D_э(\alpha)$ и $D'(\alpha)$ и производя несложные преобразования, получим

$$D(\alpha)=\frac{\sin\left[\frac{\pi dN}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]}{\frac{N}{2}\sin\left[\frac{2\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]}\left\{D_э(\alpha)\times\cos\left[\frac{\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]-\right.$$

$$\left.-iD'(\alpha)\sin\left[\frac{\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]\right\}= \qquad (1)$$

$$=D_э(\alpha)D_{pd}(\alpha)-iD'(\alpha)\sin\left[\frac{\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]D_{p2d}(\alpha),$$

где символами $D_{p\,d}(\alpha)$ и $D_{p\,2d}(\alpha)$ обозначены характеристики направленности антенных решеток из ненаправленных элементов, имеющих период d и период $2d$ соответственно. Решетка, имеющая период d, состоит из N элементов, а решетка с периодом $2d$ — $N/2$ элементов.

Первое слагаемое выражения (1) представляет собой характеристику направленности антенны при отсутствии неоднородностей, когда характеристики направленности всех элементов одинаковы и имеют вид $D_э(\alpha)$. Второе слагаемое описывает влияние искажений, вызванных неидентичностью характеристик направленности четных и нечетных элементов.

Интересно оценить максимальную величину искажения характеристик направленности многоэлементной антенны. В этом случае можно рассматривать только направления существования дополнительных, равных основному, максимумов характеристики направленности $D_{p\,2d}(\alpha)$, так как в остальных направлениях ее значения близки к нулю. Направления этих максимумов определяются уравнением $\sin\alpha_n=n\lambda/2d+\sin\alpha_0$. Подставляя это выражение в средний сомножитель второго слагаемого формулы (1), получим $\sin\pi n/2$, откуда следует, что надо принимать во внимание только нечетные максимумы решетки.

Таким образом, максимальные искажения характеристики направленности многоэлементной антенны, вызванные наличием неидентичности характеристик направленности элементов, имеющей период $2d$, следует ожидать в направлениях нечетных максимумов характеристики направленности антенной решетки, также имеющей период $2d(\alpha_n=\arcsin(n\lambda)/$ $/(2d)+\sin\alpha_0))$.

Максимальная величина искажения равна значению характеристики отличия в направлениях существования единичных максимумов $(D'(\alpha_n))$.

Рассмотрим теперь случай, когда общее число элементов антенны кратно трем и в каждой тройке характеристики направленности центральных элементов одинаковы и совпадают с характеристиками в отсутствие искажений $D_э(\alpha)$. Будем полагать, что все левые элементы в тройках тоже имеют одинаковые характеристики направленности $D_л(\alpha)$, причем $D_л(\alpha)=D_п(-\alpha)$, где $D_п(\alpha)$ — характеристики правых элементов троек, и кроме того, справедливы соотношения $D_э(\alpha)=0{,}5[D_п(\alpha)+$ $+D_л(\alpha)]$ и $D'(\alpha)=0{,}5[D_п(\alpha)-D_л(\alpha)]$. В этом случае, применяя теорему умножения и понимая под элементом антенны группу из трех элементов, можем записать

$$D(\alpha)=\frac{\sin\left[\frac{\pi dN}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]}{\frac{N}{3}\sin\left[\frac{3\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right]}\times$$

$$\times\frac{1}{3}\left[D_л(\alpha)e^{ikd(\sin\alpha-\sin\alpha_0)}+D_э(\alpha)+D_п(\alpha)e^{-ikd(\sin\alpha-\sin\alpha_0)}\right].$$

Подставляя в это выражение $D_л(\alpha)=D_э(\alpha)-D'(\alpha)$ и $D_п(\alpha)=D_э(\alpha)+D'(\alpha)$ и произведя несложные преобразования, получим

$$D(\alpha)=D_э(\alpha)D_{pd}(\alpha)-i\frac{2}{3}D'(\alpha)D_{p3d}(\alpha)\sin\left[\frac{2\pi d}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0)\right], \qquad (2)$$

где $D_{\text{р}\,d}(\alpha)$ — по-прежнему характеристика направленности решетки периода d, а $D_{\text{р}\,3d}(\alpha)$ — характеристика направленности решетки с периодом $3d$.

Рассуждая совершенно аналогично тому, как это делалось в первом случае, можно прийти к выводу о том, что неидентичности характеристик направленности, имеющие период, в 3 раза превышающий период антенной решетки, приводят к появлению искажений характеристики направленности многоэлементной антенны в направлениях $\alpha_n = \arcsin(n\lambda/3d + \sin\alpha_0)$, т. е. в направлениях существования равных основному дополнительных максимумов характеристики направленности антенной решетки с периодом, равным утроенному периоду реальной антенны, за исключением направлений максимумов, номер которых n кратен трем, так как в этих направлениях обращается в ноль один из сомножителей второго слагаемого выражения (2). Максимальная же величина искажения составляет $0{,}577D'(\alpha_{\text{п}})$.

Рассмотрим пример. Пусть $\alpha_0=0$, $D_{\text{э}}(\alpha)=\cos\alpha$, $d/\lambda=1$, характеристика отличия $D'(\alpha)$ имеет вид $b\sin\alpha$, где b — некоторый коэффициент. Легко показать, что в случае, когда период неидентичности равен $2d$, максимальные искажения характеристики направленности многоэлементной антенны наблюдаются в направлениях $\alpha=\pm30°$ и составляют $D'(30°)=0{,}5b$. Для того чтобы боковое поле антенны, вызванное этим искажением, не увеличилось более чем, например, на 10%, следует обеспечить выполнение неравенства $b\leqslant0{,}2$. В случае же неидентичности, имеющей период $3d$, максимальные искажения наблюдаются в направлениях $\alpha_1=\pm20$ и $\alpha_2=\pm42°$. Величина искажений в этих направлениях составляет соответственно $0{,}58b\sin20°$ и $0{,}58\,b\sin42°$, что при сохранении прежнего требования к искажению бокового поля приводит к неравенству $b\leqslant0{,}26$.

Представленные оценки по величине искажений, естественно, зависят от вида функции, описывающей характеристику отклонения $D'(\alpha)$, направления же максимальных искажений не зависят от вида $D'(\alpha)$; с ростом превышения периода неоднородности над периодом антенной решетки число максимальных искажений увеличивается, и они приближаются к направлению главного максимума характеристики направленности антенны.

Поступила в редакцию
5.VIII.1981
после исправления
31.III.1982