

На рис. 5 приведены графики сечения $\varphi = \pi/2$ восстановленной ДН при радиусах сферы измерений 0,5 м (сплошная линия) и 2 м (пунктирная линия) при $k_u = 25$ и 11 соответственно. Восстановление в обоих случаях проведено при $m \leq 20$ и $n \leq 40$. Восстановленная ДН для большего радиуса ближе к расчетному (кружочки), несмотря на меньшее k_u и, следовательно, большее искажение ближнего поля. Этот результат характерен для данного метода: при ограниченном числе гармоник ближнее поле надо измерять на возможно большем расстоянии от антенны.

Общее машинное время на расчет коэффициентов разложения и восстановления ДН в двух ортогональных сечениях при $m \leq 20$, $n \leq 40$ составляет около 30 мин.

При реальных измерениях в качестве антенны был выбран нестандартный пирамидальный рупор с размерами $0,20 \times 0,25$ м² и высотой 0,63 м, возбуждаемый на длине волны $\lambda = 0,033$ м. Рупор устанавливался на поворотное устройство, обеспечивающее вращение вокруг оси симметрии рупора и вертикальной оси. Точка пересечения этих осей располагалась на расстоянии 0,61 м от раскрыва рупора. Измерительная аппаратура обладала динамическим диапазоном 30 дБ и позволяла проводить измерения с погрешностью по амплитуде не более 2 дБ и по фазе — не более 20°.

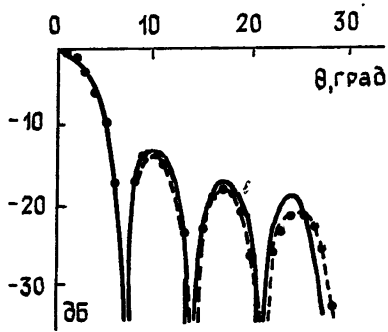


Рис. 5.

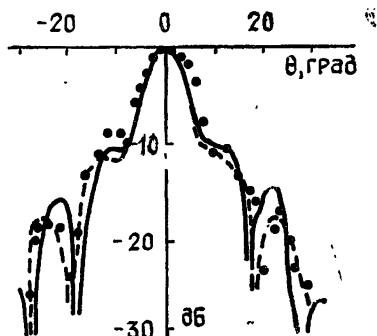


Рис. 6.

На рис. 6 приведены результаты измерения вертикального сечения ДН на расстоянии 9 м (сплошная линия) и ее восстановленные значения: методом сферических гармоник (пунктир) по измерениям на сфере радиуса $r = 1$ м и по контрольным измерениям на плоскости на расстоянии $r = 0,3$ м от раскрыва рупора (кружочки). Измерения на сфере проводились с параметрами $\theta_{\max} = 40^\circ$, $\Delta\theta = 2^\circ$, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $m \leq 10$, $n \leq 40$ *. В области главного лепестка ДН и до уровней порядка —25 дБ расхождения между измеренной и восстановленной методом сферических гармоник ДН составляет порядка 2 дБ, что согласуется с величиной погрешности измерения ближнего поля. В области боковых лепестков наблюдается некоторое расширение ДН (в пределах 5%), что объясняется, по-видимому, ограниченностью числа используемых гармоник и сектора измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Страттон Дж. А. Теория электромагнетизма. — М.: Гостехиздат, 1948.
2. Wood P. J. — The Marconi Review, 1977, 40, № 204, p. 42.
3. Захарьев Л. Н., Леманский А. А., Турчин В. И., Цейтлин Н. М., Щеглов К. С. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. — М.: Радио и связь, 1985.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
радиофизических измерений

Поступила в редакцию
8 октября 1984 г.,
после сокращения
19 апреля 1985 г.

УДК 538.56

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ГИПЕРЗВУКЕ, ВОЗБУЖДАЕМОМ МНОГОСЕКЦИОННЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ВОЛНОВЕДУЩИМИ СИСТЕМАМИ

Н. М. Ушаков, Ю. А. Зюрюкин, Е. Л. Никишин

В работе [1] получено аналитическое выражение аппаратной функции АОМ с замедляющей системой, представляющей собой односекционную ПВС. При проведении расчетов амплитудно-частотных характеристик устройств предполагалось, что коэффициент затухания электромагнитных волн в ПВС постоянен в пределах полосы рабочих

* Согласно [2, 3] необходимо, чтобы $\Delta\theta = \Delta\varphi = 1^\circ$, $n \leq 400$.

частот. Это требование выполняется при рассмотрении дифракции света на гиперзвуке, возбуждаемом односекционными ПВС, когда ширина полосы частот электроакустического преобразователя значительно шире полосы частот эффективной брэгговской дифракции. Использование же многосекционного ПВС значительно расширяет полосу брэгговской дифракции. Поскольку указанные выше полосы частот АОМ становятся сравнимыми, то необходимо знать частотную зависимость коэффициента затухания радиосигнала в ПВС.

Целью настоящей работы явилось проведение расчета эффективности дифракции света на гиперзвуке, возбуждаемом многосекционными ПВС, с учетом частотной зависимости коэффициента затухания радиосигнала в системе возбуждения.

Рассмотрим, в частности, преобразователь с ПВС, эквивалентную схему которой можно представить электрической цепочкой фильтра нижних частот (ФНЧ) [2]. Из дисперсионного соотношения для ФНЧ нетрудно получить зависимость коэффициента затухания радиосигнала в одной ячейке

$$\kappa = \text{Arch} \left[1 + 2 \left(\sqrt{1 + (16/\pi^2) (k_s^4 F_{ea}^2)} - 1 \right) \sin^2 (\Phi/2) \right],$$

$$\Phi = 2 \arcsin (f/f_{кр}),$$
(1)

где $f_{кр}$ — частота отсечки ФНЧ (критическая).

Рассмотрим отдельный преобразователь ПВС в виде резонансного пьезоэлемента (пластина, пленка), акустически связанного со звукопроводом через некоторый согласующий переходный слой. На свободную границу пьезоэлемента нанесена тыльная акустическая нагрузка, служащая одновременно электродом. В предположении, что гиперзвуковая волна плоская и среда не имеет потерь, воспользуемся соотношением для входного сопротивления нагрузки, получаемым из общего решения волнового уравнения для рассматриваемых сред и определения акустического импеданса [3]:

$$Z_{ан\ i} = -\sigma_i/u_i = -\sigma_i/j\omega u_i,$$
(2)

где σ_i — механическое напряжение в i -й среде, u_i — вектор смещения частиц в i -й среде. Используя метод расчета, изложенный в работе, получим функцию в явном виде:

$$F_{ea} = \frac{Z_1 D \sin x \sin (x/2) [D \cos (x/2) + 4A \sin (x/2)]}{2Z_n (M_1^2 + N_1^2)} +$$

$$+ \frac{(AZ_1 + Z_4) \sin^2 (x/2) [4 (Z_1 Z_4 / Z_n^2) \cos^2 (x/2) + 4A \sin^2 (x/2)]}{Z_n (M_1^2 + N_1^2)},$$

где

$$A = \cos^2 ax + (Z_1/Z_3)^2 \sin^2 ax,$$

$$D = (Z_3/Z_n) \left[1 - (Z_4^2/Z_3^2) \right] \sin 2ax,$$

$$N_1 = (2/Z_n) (AZ_1 + Z_4) \cos x - (Z_1 D/Z_n) \sin x,$$
(3)

$$M_1 = \left[(2Z_1 Z_4 / Z_n^2) + 2A \right] \sin x + D \cos x,$$

$$x = \pi (f/f_p), \quad a = (v_n/v_s) (h_3/h_n),$$

p — резонанс, f_p — резонансная частота пьезоэлемента преобразователя, Z_1 , Z_n , Z_3 , Z_4 — акустические импедансы тыльной нагрузки, пьезоэлемента, промежуточного слоя и звукопровода, v_s — скорость гиперзвука в промежуточном слое, h_3 , h_n — толщины подслоя и пьезоэлемента.

Преобразователи на основе многосекционных ПВС представляют собой последовательно соединенные секции с одинаковым или разными периодами. Поэтому интенсивность дифрагированного света на гиперзвуке, возбуждаемом такими преобразователями, можно записать как

$$I = C_1 G_1(f) + C_2 G_2(f) e^{-2\kappa_1 K_1} + \dots + C_m G_m(f) \exp \left(-2 \sum_{i=1}^{m-1} \kappa_i K_i \right),$$
(4)

где C_i — постоянные коэффициенты, G_i — аппаратная функция АОМ i -й секции преобразователя с ПВС [1], κ_i и K_i — коэффициент затухания радиосигнала и число элементов в i -й секции ПВС. Известно, что в линейном приближении эффективность брэгговской дифракции света в АОМ с преобразователями на основе ПВС определяется как [4]

$$I = I_0 \frac{\pi^2 M_2 P_0 L_{эфф}}{2\lambda_0^2 H} \left(\frac{p}{d} \right)^2 (1 - |\Gamma|^2) (1 - e^{-2\gamma L}) \frac{(1 - e^{-\gamma L})^2}{(\gamma L)^2},$$

где $L_{эфф} = L(d/p)$ — длина акустооптического взаимодействия, L — длина ПВС, $\gamma = \kappa/p$ — коэффициент затухания радиосигнала в ПВС, p — период ПВС, d — шири-

На отдельного акустического излучателя. Постоянные коэффициенты в (4) определяются как

$$C_i = \frac{\pi^2 M_2 P_0}{2 \lambda_0^2} (\rho_i/d_i) (L_i/H_i),$$

где P_0 — мощность радиосигнала, M_2 — коэффициент акустооптического качества звукапровода. Аппаратная функция АОМ, как уже отмечалось, позволяет проводить расчеты взаимодействия световых и акустических пучков произвольного типа.

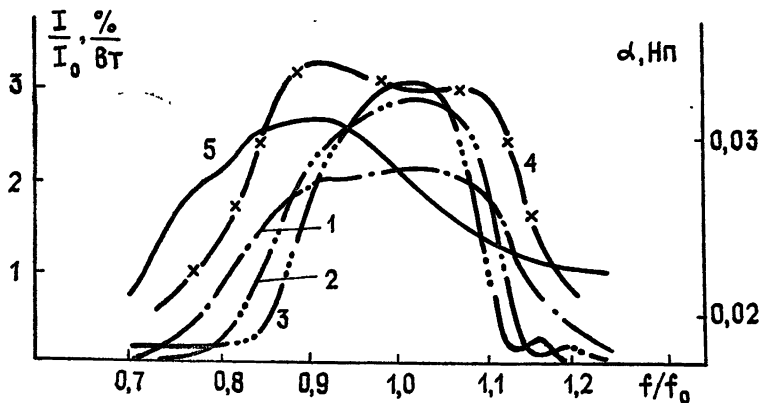


Рис. 1.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости коэффициента затухания радиосигнала в ПВС (кривая 5) и интенсивности дифракции от нормированной частоты радиосигнала АОМ с односекционным преобразователем для разных значений параметра L/H : кривая 1 ($L/H=3$), кривая 2 ($L/H=5$), кривая 3 ($L/H=7$). Изменение значений параметра L/H связано только с изменением числа элементов ПВС. При этом предполагалось, что $p=2d$, $k_m=0,22$ ($m=-1$), $k_2^2=0,08$ (ZnO), $P_0=1$ Вт, $|\Gamma|=0,33$ ($KCB=2$), $f_{кР}=3,5 \cdot 10^9$ Гц, $f_{н}=1,5 \cdot 10^9$ Гц, $v_{п}=6 \cdot 10^3$ м/с, $v_3=4,2 \cdot 10^3$ м/с, $v_4=6,57 \cdot 10^3$ м/с, $h_3=0,15 \cdot 10^{-6}$ м, $h_{п}=1,9 \cdot 10^{-6}$ м, $Z_1=4,1 \cdot 10^7$ $H \cdot c/m^3$ (Cu), $Z_{п}=3,5 \cdot 10^7$ $H \cdot c/m^3$ (ZnO), $Z_3=4 \cdot 10^7$ $H \cdot c/m^3$ (Cr+Au), $Z_4=3,4 \cdot 10^7$ $H \cdot c/m^3$ ($LiNbO_3$, ср.—X), $\lambda_0=0,63 \cdot 10^{-6}$ м, $M_2=7 \cdot 10^{-15}$ c^3/m ($LiNbO_3$, ср.—X).

Период ПВС односекционного преобразователя $p=0,22 \cdot 10^{-3}$ м. Как следует из приведенных зависимостей, увеличение числа элементов ПВС приводит к росту интенсивности дифрагированного света и сужению полосы рабочих частот. Эффективность дифракции при этом составляет 2–3%/Вт, а относительная полоса рабочих частот — 33, 24 и 20% соответственно.

Использование преобразователя, состоящего из двух секций, расположенных в одной плоскости с периодами ПВС — $p_1=0,115 \cdot 10^{-3}$ м и $p_2=0,12 \cdot 10^{-3}$ м — и с равным числом элементов $K=60$, приводит к увеличению эффективности дифракции света более чем в 1,5 раза (см. кривые 1 и 4) при сохранении полосы рабочих частот. Это объясняется тем, что в случае многосекционной ПВС возрастает длина акустооптического взаимодействия и дифракция света происходит последовательно на гиперзвуковых полях каждой из секций.

В заключение следует отметить, что использование многосекционных преобразователей позволяет увеличить такую характеристику системы, как произведение эффективности дифракции на полосу рабочих частот АОМ более чем в 1,5 раза по сравнению с системой, где применяются односекционные преобразователи. Ограничение количества применяемых секций ПВС в основном связано с затуханием радиосигнала в системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зюрюкин Ю. А., Ушаков Н. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 8, с. 1065.
2. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. — М.: Энергия, 1966, с. 9.
3. Полотнягин В. А., Шевчик В. Н. — Радиотехника и электроника, 1972, 27, № 6, с. 1260.
4. Зюрюкин Ю. А., Ушаков Н. М. Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Исследование и разработка прецизионных измерительных комплексов и систем с использованием радиоволновых и оптических каналов связи». Ч. 2. — Томск, 1981, с. 64.