

УДК 681.883:629

АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Е. В. Захарова,

аспирант

П. Н. Петров,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Систематизированно изложены с единых методических позиций вопросы пространственной обработки сигналов антенных решеток малоизвестным классом акустоэлектронных устройств с переизлучающей решеткой. Отмечена перспективность, с точки зрения технологичности производства, аналоговых процессоров на поверхностных акустических волнах, использующих анизотропные подложки, которые в то же время являются малоэлементными. Описаны структурные схемы акустоэлектронных устройств, служащие в качестве диаграммообразующих схем для многоэлементных антенных решеток.

Ключевые слова — аналоговые процессоры, поверхностные акустические волны, пространственная обработка, многоэлементные антенные решетки, диаграммообразующие схемы.

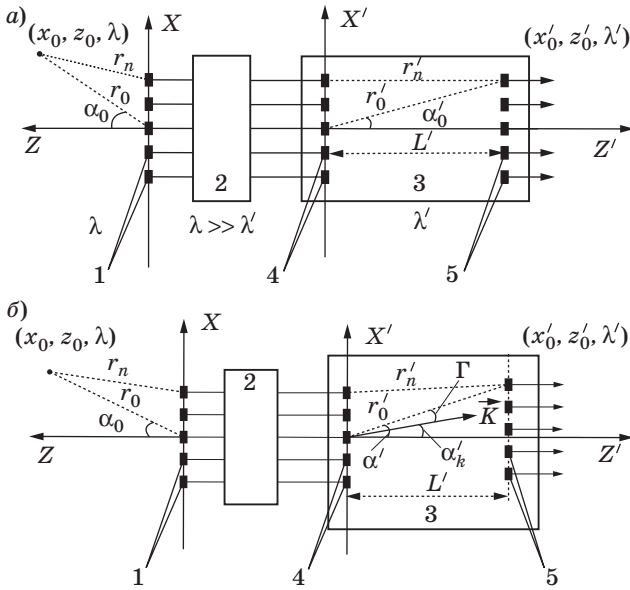
Введение

В научно-технической литературе представлены основные теоретические результаты, подтверждающие принципы построения устройств с масштабными переизлучающими решетками (МПР), топологию и характеристики акустических процессоров, возможные области их применения [1, 2].

Конкурентоспособность любых устройств, в том числе акустических процессоров, по сравнению с аналогами может поддерживаться на высоком уровне только при достижении потенциальных параметров. И если повышение рабочего диапазона частот (или уменьшение длин волн λ) зависит прежде всего от развития технологии, то другие параметры, такие как полоса пропускания $2\Delta f$, максимально возможное для обработки акустическими процессорами число элементов антенных решеток (АР) $N_0 = 2N + 1$ или их апертуры $D = N_0 d$ (где d — расстояние между элементами АР), способность пространственного разрешения в ближней и дальней зоне антенны, чаще всего определяются топологическими и конструкторскими решениями. Данный подход является приоритетным в современных исследованиях в области прикладной акустоэлектроники.

Как известно, оптимизация пространственно-временной обработки сводится к алгоритмам линейной фильтрации, являющимся частью общего алгоритма обнаружения, измерения, классификации и обработки изображений, включающего и нелинейные операции. Излучающую антенну, среду распространения электромагнитных (или акустических) волн, приемную АР и устройство с МПР можно представить как совокупность последовательно включенных линейных фильтров, осуществляющих ряд операций над сформированным излучающей антенной пространственно-временным сигналом. В статье [3] показана обобщенная функциональная схема информационно-измерительного канала активной (наиболее полной) локационной системы с устройством МПР, осуществляющим пространственно-временную обработку сигналов АР.

Для обеспечения информационной пропускной способности канала или количественного измерения информационной емкости сигнала используется величина $E = \lg N_n$, где N_n — число независимых информационных (временных, пространственных, поляризационных) степеней свободы сигнала. Без учета поляризационных степеней свободы сигнала для линейной АР [4]



■ **Рис. 1.** Устройство МПР (а) и аналоговый процессор на анизотропной подложке (б): 1 — элементы линейной АР; 2 — многоканальный преобразователь частоты; 3 — подложка акустического процессора; 4 — элементы переизлучающей решетки; 5 — элементы считывающей решетки

$$N_n = \frac{4\Delta f \tau \cdot 2D^2}{\lambda z}, \quad (1)$$

где τ — временная продолжительность сигнала; z — проекция расстояния до источника (x_0, z_0, λ) сигнала на ось Z (рис. 1, а).

Из выражения (1) следует, что величина N_n зависит от апертуры D антенны, т. е. от числа элементов эквидистантной линейной АР, следовательно, и от числа элементов переизлучающей решетки акустического процессора. Однако при реализации акустоэлектронных устройств возникает ряд проблем практического характера, препятствующих достижению расчетных и предельных параметров данных устройств. Поэтому рассмотрим технологические и топологические возможности изготовления акустических процессоров, позволяющих, с одной стороны, наиболее полно реализовать их выявленные потенциальные возможности, а с другой стороны, предложить конструкторские решения, способствующие увеличению числа элементов линейной АР.

Число каналов в аналоговых процессорах

Попытаться обосновать ограничения количества каналов в аналоговых процессорах можно с различных точек зрения.

В работах [1, 5, 6] определялось максимальное число элементов переизлучающей решетки в зависимости от размеров подложки, ее типа, т. е.

электромеханической константы, полосы, величины рабочих частот, технологических возможностей литографии. При этом считали минимальную апертуру преобразователя $d_k = \lambda$, задавались величиной омической составляющей проводимости преобразователей и фиксировали размеры подложки. Если воспользоваться результатами этих работ, то можно установить, что число преобразователей колеблется от 20 до 40 для пьезокварца, а также от 15 до 30 для германата висмута и ниобата лития.

Возможен также «топологический» подход к данной проблеме. Универсальной характеристикой, определяющей основные показатели устройства обработки, в частности пространственные, является пространственная импульсная характеристика (ПИХ) $H(\mathbf{r}, \alpha, \beta, \alpha', \beta')$, где α (α') и β (β') — углы места и азимута в пространстве объектов и в пространстве изображений (в среде обработки аналогового процессора). ПИХ является откликом на монохроматический δ -источник и определяется с точностью до несущественного множителя как [3]

$$H(k, \alpha_0, \beta_0, \alpha'_0, \beta'_0) = C \int_{\mathbf{r}} P(k, \mathbf{r}) V(k, \alpha_0, \beta_0, \mathbf{r}) W(k, \alpha'_0, \beta'_0, \mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

где $P(k, \mathbf{r})$ — функция раскрытия; $V(k, \alpha, \beta, \mathbf{r})$ — функция, определяющая распределение комплексных амплитуд принимаемых сигналов; $W(k, \alpha', \beta', \mathbf{r})$ — опорная функция акустоэлектронного устройства; $k = 2\pi/\lambda$; \mathbf{r} — радиус-вектор точки на раскрытии АР.

В приближении дальней зоны ПИХ устройств МПР равна

$$h(k, \alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0) = \iint_{(x, y) \in Z} P(k, x, y) \times W(k, x, y, \alpha_0, \beta_0) \times \exp[-jk \times (x \sin \alpha \cos \beta + y \sin \beta + z \cos \alpha \cos \beta)] dx dy. \quad (2)$$

Выражение (2), нормированное к значению $h(k, \alpha = \alpha_0, \beta = \beta_0)$, служит характеристикой направленности антенны.

Опорная функция устройства МПР обработки сигналов линейной АР описывается приближенно (в системе координат рис. 1) выражением [1]

$$W(x') \cong \exp[-jk'(x' \sin \alpha' + L' \cos \alpha')],$$

где L' — расстояние между переизлучающей и считывающей решетками; $k' = 2\pi/\lambda'$, λ' — длина волны в аналоговом процессоре. Там же показано, что погрешность такого представления не превосходит $|\Delta\phi|$ радиан при выполнении условия

$$L' \geq \left[\frac{\pi (D')^4}{|\Delta\phi| 64\lambda'} \sin \alpha' \operatorname{tg} \alpha' \right]^{1/3}.$$

Из этого условия ясно, что при любом числе элементов переизлучающей решетки выбором соответствующего расстояния L' до считывающей решетки можно обеспечить заданное $|\Delta\varphi|$. Таким образом, все опять свелось к подложкам, обладающим необходимыми размерами.

По-видимому, можно сказать, что жестких принципиальных ограничений на число каналов аналоговых процессоров нет, и если не вводить каких-либо дополнительных условий, все сводится, в конечном итоге, к волновым размерам подложки. Нами был разработан процессор на изотропной подложке из плавленного кварца на рабочей частоте 7 МГц, с числом элементов переизлучающей решетки 239, считывающей — 170.

Если габариты монолитных процессоров по каким-либо причинам являются неприемлемыми, возможны различные компромиссные варианты построения данного типа акустоэлектронных устройств.

Варианты построения акустоэлектронных устройств МПР для многоэлементных линейных АР

Перепишем, с учетом дискретности решеток, выражение (2), описывающее ПИХ устройств обработки сигналов эквидистантных линейных АР:

$$h_T(\alpha_0, \alpha') = C \sum_{n=-N}^N P(nd) \exp\{-jknd(\sin\alpha_0 - \mu^{-1}\sin\alpha')\}, \quad (3)$$

где $x = nd$, $x' = nd'$, а d и d' — расстояния между элементами линейной АР и переизлучающей решетки; $\mu = \sin\alpha'_0 / \sin\alpha_0$ — коэффициент углового масштаба.

При $P(x) = \text{const}$ выражение (3) может быть записано в замкнутом виде с использованием формулы суммы для $2N + 1$ членов геометрической прогрессии с точностью до несущественных постоянных множителей как

$$h_T(\alpha_0, \alpha') = C_1 \exp[j(k'r'_0 - kr_0)] \times \frac{\sin[(N + 0,5)(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]}{\sin[0,5(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]}, \quad (4)$$

где C_1 — коэффициенты пропорциональности, а нормированный модуль

$$H_T(\alpha_0, \alpha') = \left| \frac{\sin[(N + 0,5)(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]}{(N + 0,5)\sin[0,5(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]} \right|. \quad (5)$$

Пространственные импульсные характеристики описываются хорошо известной функцией

вида $\sin N_0 t_p / N_0 \sin t_p$, носящей периодический характер. При $t_p = \pi m$, где m — любое целое число, функция $H_T(\alpha_0, \alpha')$ равна единице. При $t_p = \pi s / N_0$, где s — любое целое число, эта функция равна нулю, кроме случаев, когда $s = mN_0$. Выбрав направление главных максимумов (парциальных диаграмм направленности (ДН)) совпадающим с нулями соседних парциальных диаграмм, т. е. размещая элементы считывающей решетки согласно критерию Релея и учитывая выражение (3), можно записать

$$H(m) = \sum_{n=0}^{N_0-1} x^0(nd) W_{N_0}^{mn}, \quad (6)$$

где $m = 0, \dots, N_0 - 1$ — номер элементов считывающей решетки выходных процессоров; $x^0(nd) = P(nd) \exp(jknd \sin\alpha_0)$; n — номер элементов АР, $n = 0, \dots, N_0 - 1$;

$$W_{N_0}^{mn} = \exp\left\{-j \frac{2\pi mn}{N_0}\right\}.$$

Выражение (6), в котором $x^0(nd)$ есть последовательность из N_0 пространственных отсчетов с периодом d , а $H(m)$ — последовательность из N_0 частотных отсчетов, является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Акустический процессор, построенный таким образом, является диаграммообразующей схемой (ДОС), выполняющей ДПФ.

Наиболее технологичными в настоящее время являются аналоговые процессоры на поверхностных акустических волнах (ПАВ), использующие анизотропные подложки небольших волновых размеров. Вид функции $H_T(\alpha_0, \alpha')$ сохраняется, если осуществить замену [6] $t_p = (kd \sin\alpha_0 - k'd' \sin\alpha')$ на $t_A = [kd \sin\alpha_0 - k'(\alpha_k)d' \sin(\alpha' - \Gamma)]$, где Γ — угол между направлениями фазовой и групповой скоростей; α_k — угол, определяющий направление распространения волны относительно кристаллографических осей для данного среза кристалла (рис. 1, б).

Если из-за габаритов подложки аналоговый процессор, непосредственно вычисляющий (6), создать затруднительно, то можно воспользоваться акустоэлектронным устройством, построенным по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ) для произвольного составного N_0 [7]. В этом случае вычисление N_0 -точечного ДПФ можно свести к определению $N_1 N_2$ -точечных и $N_2 N_1$ -точечных ДПФ и N_0 умножениям на множители поворота W_{N_0} . Сделав подстановку

$$m = m_1 + m_2 N_2, \quad n = n_1 + n_2 N_1,$$

где $N_0 = N_1 N_2$; $n_1, m_2 = 0, \dots, N_1 - 1$; $n_2, m_1 = 0, \dots, N_2 - 1$, преобразуем (6) к виду

$$\begin{aligned}
 H(m_1 + m_2 N_2) = & \\
 = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} & \left[\sum_{n_2=0}^{N_2-1} x^0[(n_1 + n_2 N_1)d] W_{N_2}^{m_1 n_2} \right] W_{N_2}^{m_1 n_1} \times \\
 & \times W_{N_1}^{m_2 n_1}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Используя алгоритм (7), можно получить алгоритмы БПФ с любыми основаниями, т. е. применить аналоговые процессоры с любым числом элементов решеток. Так, на рис. 2 представлен 25-точечный граф, состоящий из десяти 5-точечных ДПФ ($N_1 = 5, N_2 = 5$). На нескольких малоэлементных аналоговых процессорах можно реализовать ДОС для АР, имеющих несколько сотен приемных элементов.

Еще одним способом обработки сигналов многоэлементных АР процессорами с ограниченным числом элементов является группирование элементов антенны в подрешетки [8, 9]. На рис. 3 показана одна из возможных схем такого группирования, где 1 — элементы АР; 2 — аналоговые процессоры — ДОС; 3 — коммутаторы каналов; 4 — аналоговый процессор с веерными считывающими преобразователями [1], рассчитанный на работу с АР, элементами которой являются подрешетки. В этом случае функцией приемных элементов АР с управляемой ПИХ выполняют аналоговые процессоры (ДОС) в совокупности с коммутатором каналов. При этом эффективность формирования суммарной ПИХ достигается синхронным смещением ПИХ одиночного приемного элемента (подрешетки) и множителя всей решетки.

Используя теорему умножения и учитывая выражение (4), пространственную импульсную характеристику данного устройства МПР запишем как

$$\begin{aligned}
 h_N(\alpha_0, \alpha') = & h_T(\alpha_0, \alpha') \times \\
 & \times \frac{\sin[M(kd_M \sin \alpha_0 - k'd'_M \sin \alpha')]}{\sin[(kd_M \sin \alpha_0 - k'd'_M \sin \alpha')]},
 \end{aligned}$$

где M — количество подрешеток; d_M — расстояние между центрами подрешеток; d'_M — расстояние между элементами переизлучающей решетки аналогового процессора с коммутируемыми входами.

Был рассчитан и изготовлен аналоговый процессор на ПАВ, использующий анизотропную подложку из ниобата лития YZ-среза на рабочей частоте 18,45 МГц с полосой 3,8 МГц, числом элементов переизлучающей решетки 15 и с развязкой между элементами 34 дБ. Он размещен в корпусе микросборки, габариты которого $40 \times 20 \times 2$ мм. Данный процессор может служить в качестве базового элемента для устройств, изображенных на рис. 2 и 3.

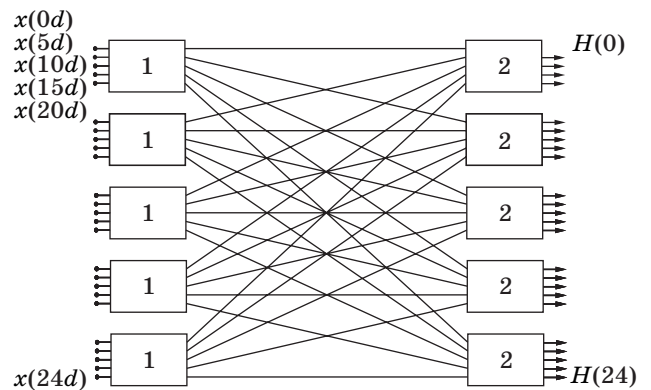


Рис. 2. Структурная схема устройства пространственного БПФ

Предложенные варианты построения устройств МПР либо осуществляют сканирование одной или несколькими ДН, либо формируют веерообразную приемную ДН. Кроме того, акустические процессоры, обладая свойствами обратимости, могут как обрабатывать принимаемые сигналы АР, так и формировать ДН на излучение. В этом случае сигнал подается на элементы считывающей решетки, а на переизлучающей ре-

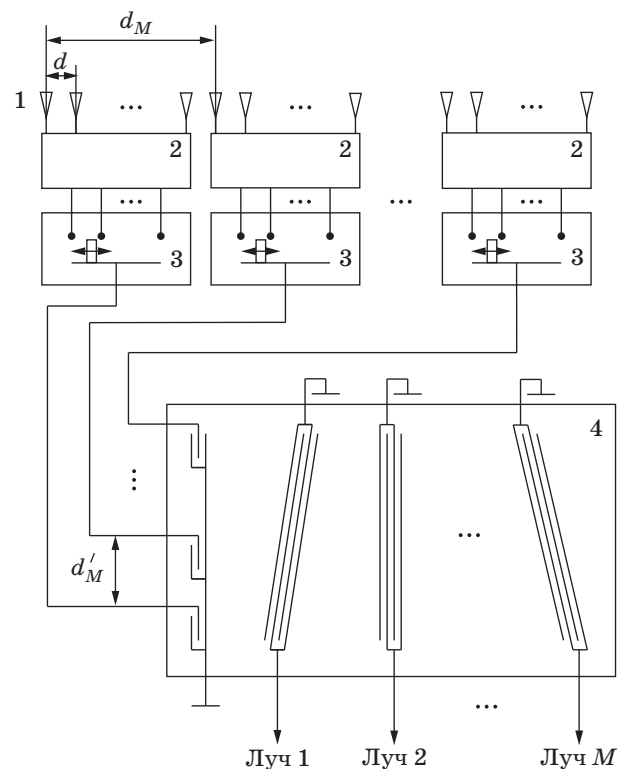


Рис. 3. Комбинированный способ построения устройств МПР: 1 — элементы АР; 2 — аналоговые процессоры — ДОС; 3 — коммутаторы каналов; 4 — аналоговый процессор на ПАВ

шетке и, следовательно, на элементах АР формируется амплитудно-фазовое распределение, позволяющее излучать сигналы под определенным углом α к оси АР.

Заключение

Современные аналоговые ДОС на промежуточной частоте, к которым относятся ДОС на ПАВ, сохраняя достоинства аналоговых устройств, могут конкурировать с другими, в том числе и с цифровыми, устройствами по массогабаритным параметрам, простоте изготовления, надежности, стоимости и другим технико-эксплуатационным характеристикам.

Наиболее перспективными с точки зрения технологичности производства являются аналоговые процессоры на ПАВ, использующие анизотропные подложки. Однако на них можно реализовать ДОС с заданными параметрами только для антенн, имеющих от 10 до 30 приемных элементов.

Предложенные два варианта группирования элементов в подрешетки позволяют создавать ДОС (на базе малоканальных аналоговых процессоров различных видов) для одномерных АР, содержащих до нескольких сотен приемных элементов. Комбинированный способ построения акустоэлектронных ДОС позволяет существенно увеличить информационную пропускную способность радиоканалов с антенными решетками.

Литература

1. **Рогачев В. И., Петров П. Н., Кравец В. С., Кулаков С. В.** Акустоэлектронные устройства обработки гидроакустических сигналов. — СПб.: Судостроение, 1993. — 184 с.
2. **Petrov P. N., Kulakov S. V., Molotok V. V.** Recent advance in acoustoelectronic and acoustooptic phase antenna array signal processing // *The J. of Polish Acoustic Society*. 2002. Vol. 21. P. 147–160.
3. **Петров П. Н., Сенин А. В.** Пространственно-временная обработка сигналов акустоэлектронными устройствами с масштабными переизлучающими решетками // *Информационно-управляющие системы*. 2006. № 3(22). С. 5–11.
4. **Качанов Е. И., Пигулевский Е. Д., Яричин Е. М.** Методы и средства гидроакустической голографии. — Л.: Судостроение, 1989. — 256 с.
5. **Гуревич Г. Л., Жиженкова Л. Н., Пасхин В. М., Шкатов Н. В.** Исследование акустоэлектронных устройств пространственной обработки сигнала // *Радиотехника и электроника*. 1985. № 6. С. 1194–1199.
6. **Petrov P. N.** Spatial pulse response of the multielement acoustoelectronic processor // *SPIE*. 1999. Vol. 3900. P. 263–266.
7. **Гольдберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Полен М. Н.** Цифровая обработка сигналов: справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
8. **Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И.** Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
9. **Самойлов Л. К.** Электронное управление характеристиками направленности антенн. — Л.: Судостроение, 1987. — 286 с.