

УДК 534.232.8:534.8

## АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЙ ФАЗОВЫЙ ДЕМОДУЛЯТОР

**А. П. Абрамов,**

канд. техн. наук

**П. Н. Петров,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Разработана и описана структурная схема акустоэлектронного фазового демодулятора. Рассмотрены топологии и характеристики основных элементов на поверхностных акустических волнах, входящих в состав демодулятора. Представлены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова** — поверхностная акустическая волна, функция угловой модуляции, фазовая демодуляция, встречно-штыревой преобразователь, дифференцирующий канал, акустоэлектронный интегратор радиосигналов.

Постоянно растущие требования, предъявляемые к современным радиотехническим системам при решении задач обнаружения, идентификации и обработки сигналов, привели к использованию в этих системах множества сложных сигналов, отличающихся не только базой, но и видом функции угловой модуляции. Ряд перечисленных задач успешно решается современными цифровыми процессорами, имеющими высокую точность и большой динамический диапазон. Однако с увеличением ширины спектра обрабатываемых сигналов их точность и динамический диапазон падают, а габаритные размеры, масса, потребляемая мощность и стоимость возрастают. Это привело к созданию комбинированных аналогово-цифровых устройств обработки сигналов, в которых роль первичной обработки отведена аналоговым устройствам, а роль вторичной обработки — цифровым.

При фазовой демодуляции сигналов с большой базой требуются аналоговые устройства, позволяющие либо непосредственно в ВЧ-диапазоне частот, либо на промежуточной частоте однозначно определять их фазовую структуру в широком диапазоне фазовых углов, компенсируя при этом начальную фазу и линейную составляющую текущей фазы обрабатываемого сигнала.

Радиосигнал с большой базой и произвольным видом функции угловой модуляции можно представить в виде

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0] \quad \text{при } |t| \leq \frac{T_c}{2}, \quad (1)$$

где  $A(t)$  — огибающая;  $\omega_0 t$  — линейная составляющая текущей фазы;  $\theta(t)$  — функция угловой мо-

дуляции;  $\varphi_0$  — начальная фаза;  $T_c$  — длительность;  $\Psi(t) = [\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0]$  — фазовая структура радиосигнала.

Для решения вышепоставленной задачи радиосигнал (1) необходимо подвергнуть двухстороннему амплитудному ограничению и полученный результат обработать по алгоритму

$$\psi_1(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [s'(t) - \omega_0 \hat{s}(t)] \hat{s}(t) dt, \quad (2)$$

где  $s'(t) = A_0[\omega_0 + \theta'(t)] \sin[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0]$  — сигнал, огибающая которого прямо пропорциональна мгновенной угловой частоте обрабатываемого радиосигнала;  $\hat{s}(t) = A_0 \sin[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0]$  — сигнал, сопряженный по Гильберту с обрабатываемым радиосигналом при выполнении условия  $(\Delta\omega/\omega_0) \ll \ll 1$ , где  $\Delta\omega$  — ширина спектра обрабатываемого радиосигнала.

На основе достижений акустоэлектроники и ее элементной базы [1, 2] разработан и технически реализован акустоэлектронный фазовый демодулятор — АФД (рис. 1), осуществляющий в полосе частот  $\Delta f = 6,5$  МГц с центральной частотой  $f_0 = 25$  МГц обработку радиосигнала (1) в соответствии с алгоритмом (2).

Функциональные основополагающие элементы демодулятора — двухканальный полосовой фильтр (ДПФ) и акустоэлектронный интегратор радиосигналов (АИР) — реализованы с помощью устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Топология двухканального полосового фильтра на ПАВ представлена на рис. 2. В его состав



$$s_2(t) = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} s_1(\tau)h_1(t-\tau)d\tau = \frac{A_0B_0\Delta\omega}{2\pi}\theta'(t)\sin[\omega_0t + \theta(t) + \varphi_0], \quad (9)$$

а на выходе опорного канала — сигнал

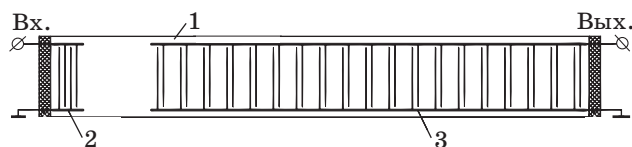
$$\hat{s}(t) = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} s_1(\tau)h_2(t-\tau)d\tau = \frac{A_0B_0\Delta\omega}{2\pi}\sin[\omega_0t + \theta(t) + \varphi_0]. \quad (10)$$

Таким образом, для определения функции  $\theta(t)$  необходимо в сигнале (9) предварительно устранить внутриимпульсную угловую модуляцию и полученный результат преобразовать по частоте. Данная операция в разработанном устройстве (см. рис. 1) осуществляется с помощью балансного модулятора, на один из входов которого поступает сигнал (9), а на другой вход — сигнал (10), предварительно преобразованный по частоте на частоту несущего колебания  $\omega_1 = (\omega_0 - \omega_r)$ , где  $\omega_r$  — частота гармонического колебания, вырабатываемого опорным гетеродином преобразователя частоты. В результате этого на выходе ПУ4, настроенного на разностную частоту, формируется сигнал

$$s_3(t) = \frac{A_0B_0\Delta\omega}{2\pi}\theta'(t)\cos(\omega_2t). \quad (11)$$

Акустоэлектронный интегратор радиосигналов на ПАВ (рис. 5) реализован на пьезоэлектрической подложке 1 из кварца YX-среза. На ее полированной поверхности размещены широкополосный входной 2 и узкополосный выходной 3 двухфазные эквидистантные ВПП ПАВ. АЧХ интегратора на ПАВ описывается модулем функции  $|\sin x/x|$ , а его импульсная характеристика представляет собой радиоимпульс с частотой несущего колебания  $f_2 = f_r = 15$  МГц и длительностью  $T = 50$  мкс. В связи с этим импульсную характеристику интегратора на ПАВ, без учета вносимой им постоянной задержки  $t_0$ , можно представить в виде

$$h_3(t) = \frac{1}{T}\prod_T(t)\cos(\omega_2t) \text{ при } 0 < t \leq T, \quad (12)$$



■ Рис. 5. Акустоэлектронный интегратор радиосигналов

где

$$\prod_T(t) = Y(t) - Y(t-T),$$

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < \infty, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Амплитудно-частотная и импульсная характеристики интегратора на ПАВ, полученные экспериментально, представлены на рис. 6.

При воздействии на вход АИР радиосигнала (11) происходит свертка входного воздействия с импульсной характеристикой АИР, в результате чего на выходе АИР на интервале времени  $(0, 2T)$  формируется сигнал, содержащий «двойную» информацию о функции угловой модуляции радиосигнала (8). При этом одна из них сосредоточена на интервале времени  $(0, T)$ , а другая — на интервале времени  $(T, 2T)$ , но с противоположным знаком. Для исключения повторной информации выходной сигнал АИР подается на вход СК (см. рис. 1), длительность «окна» которого соизмерима с длительностью импульсной характеристики АИР. В результате этого на выходе СК формируется сигнал вида

$$s_3(t) = \frac{A_0B_0\Delta\omega}{8\pi T}[\theta(t)]\cos\omega_2t$$

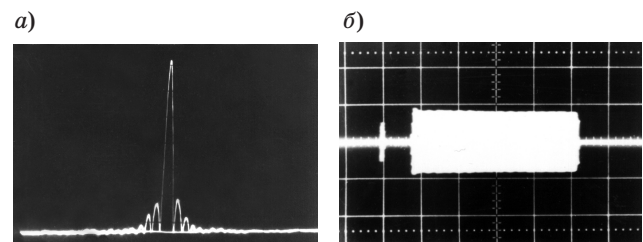
при  $0 \leq t \leq T$ ,

огibaющая которого прямо пропорциональна функции угловой модуляции обрабатываемого радиосигнала (8).

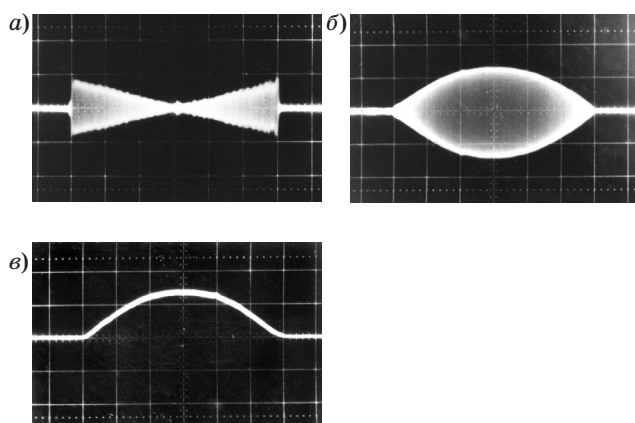
В целях экспериментального подтверждения вышеизложенного в качестве сигналов, подаваемых на вход АФД, использовались:

а) линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал с постоянной амплитудой, средняя частота которого совпадает с центральной частотой, а максимальная девиация частоты не превышает полосы пропускания АФД;

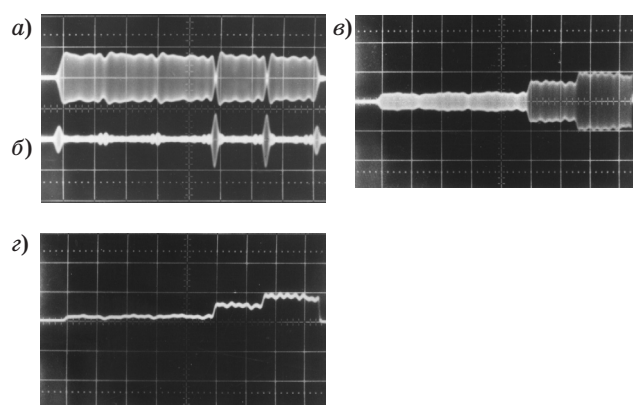
б) фазомодулированный (ФМ) сигнал, состоящий из пяти элементов одинаковой амплитуды и длительности, с частотой несущего колебания, совпадающей с центральной частотой полосы пропускания АФД, и со скачками фазы на величину  $\pi$  между 3–4 и 4–5 элементами.



■ Рис. 6. Амплитудно-частотная (а) и импульсная (б) характеристики интегратора на ПАВ



■ **Рис. 7.** Осциллограммы сигналов в основных узлах АФД при обработке ЛЧМ-сигнала: а — сигнал на выходе дифференцирующего канала ДПФ; б — сигнал на выходе строб каскада; в — сигнал на выходе амплитудного детектора



■ **Рис. 8.** Осциллограммы сигналов в основных узлах АФД при обработке ФМ-сигнала: а — сигнал на выходе опорного канала ДПФ; б — сигнал на выходе дифференцирующего канала ДПФ; в — сигнал на выходе строб каскада; г — сигнал на выходе амплитудного детектора

Результаты обработки ЛЧМ- и ФМ-сигналов, полученные экспериментально, представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

При обработке ЛЧМ-сигнала на выходе АФД формируется сигнал с огибающей, прямо пропорциональной функции угловой модуляции, представляющей собой квадратичную параболу, основание которой расположено в центре выходного сигнала (см. рис. 7, в).

При обработке ФМ-сигнала на выходе АФД формируется сигнал с огибающей, прямо пропорциональной функции угловой модуляции, закон изменения которой имеет ступенчатый характер (см. рис. 8, г). При этом величина ступенек, расположенных в начале и в конце ФМ-сигнала, пропорциональна фазовому скачку на величину  $\pi/2$ , а величина ступенек, расположенных между 3–4 и 4–5 элементами ФМ-сигнала, пропорциональна  $\pi$ .

Таким образом, рассмотренный АФД позволяет обрабатывать сложные сигналы с любым видом функции угловой модуляции, обеспечивая однозначное определение функции  $\theta(t)$  в широком диапазоне фазовых углов.

### Литература

1. **Дмитриев В. Ф.** Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. Основы теории, расчета и проектирования: Учеб. пособие / ГУАП. — СПб., 2006. — 169 с.
2. **Баруздин С. А., Егоров Ю. В., Калиникос П. А. и др.** Функциональные устройства обработки сигналов (основы теории и алгоритмы): Учеб. пособие для вузов / Под ред. Ю. В. Егорова. — М.: Радио и связь, 1997. — 288 с.