

ПАВ-РАДИОМЕТКА НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛОСКОВОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ СО СНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ ПАРАЗИТНЫХ СИГНАЛОВ

С. П. Дорохов, А. С. Салов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

В настоящее время перспективным направлением развития радиотехнических комплексов дистанционной идентификации и контроля состояния объектов является разработка транспондеров, ключевой элемент в которых – радиометки, функционирующие на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Основное преимущество таких устройств заключается в их устойчивости к различным дестабилизирующим факторам, таким, как воздействие ионизирующего излучения, ударных перегрузок и температурных воздействий в широком диапазоне.

Работа ПАВ-радиометки транспондера основана на генерации поверхностной акустической волны встречно-штыревым преобразователем (ВШП) при подаче на него опрашивающего радиоимпульса, прохождении ПАВ по поверхности пьезоэлектрической подложки и ее взаимодействии с расположенными на поверхности подложки отражательными структурами (ОС). При достижении ОС, ПАВ частично отражается и возвращается на ВШП, где, в результате прямого пьезоэффекта, преобразуется на его электродах в ответный информационный сигнал, содержащий идентификационный номер объекта и информацию о воздействовавших на него в процессе эксплуатации факторах.

Для осуществления правильной идентификации объекта и получения достоверной информации о его состоянии, одной из основных задач на стадии проектирования радиометки является необходимость производить расчет, позволяющий учесть влияние переотражений ПАВ от ОС и других вторичных эффектов, влияющих на характеристики систем дистанционной радиочастотной идентификации.

Целью настоящей работы является анализ физических механизмов переотражений в радиометках на ПАВ, моделирование импульсного отклика тестовой структуры одного канала радиометки, разработка конструкции ПАВ-радиометки со сниженным влиянием переотражений и увеличенным отношением «сигнал/шум».

Конструкции радиометок на ПАВ с амплитудным кодированием

В условиях воздействия дестабилизирующих факторов необходимую достоверность получаемых данных обеспечивает амплитудное кодирование ин-

формационного сигнала. Для достоверной идентификации объекта задается определенный уровень сигнала, при превышении которого импульс распознается как «1», если амплитуда импульса меньше заданного уровня, импульс идентифицируется как «0».

Конструкция радиометки на ПАВ с амплитудным кодированием представлена на рис. 1. Кодированная последовательность импульсов формируется путем переотражения сигнала опроса от системы ОС путем наличия («1») или отсутствия («0») отраженного импульса в заданном временном интервале. Поскольку в данной конструкции все отражательные группы располагаются в одном акустическом канале, возникает проблема множественных переотражений между ОС, формирующими информационный код.

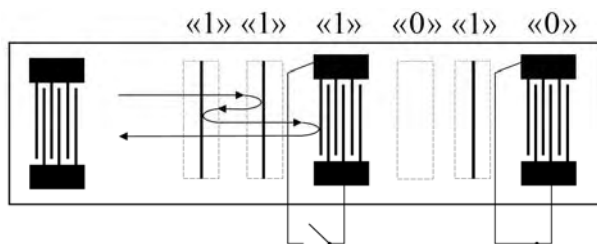


Рис. 1. Одноканальная конструкция радиометки на ПАВ с амплитудным кодированием

Один из способов решения данной проблемы описан в работе [1], где авторы предлагают для минимизации переотражений использовать для одного акустического канала не более 8 групп ОС, работая при этом с 4 акустическими каналами на увеличенной апертуре входного ВШП.

Другим решением проблемы множественных переотражений между группами ОС стал переход к многоканальной конструкции [2, 3, 4]. Для уменьшения уровня паразитных переотраженных сигналов каждую отражательную группу помещают в отдельный акустический канал, тем самым формируют многоканальную конструкцию (рис. 2). Ее преимущество заключается в возможности пространственного разнесения акустических каналов, обеспечивающих пониженный уровень ложных импульсов при формировании информационного сигнала с высоким коэффициентом отражения от каждой ОС.

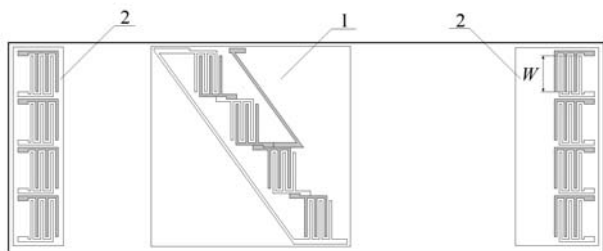


Рис. 2. Структурная схема многоканальной конструкции радиометки: 1 – входной / выходной преобразователь, состоящий из ненаправленных ВШП, 2 – отражательные структуры, W – апертура отражательной структуры

Каждый ВШП входного преобразователя генерирует поверхностную акустическую волну, в поле которой в параллельных акустических каналах на различных расстояниях от входного преобразователя размещены отражательные структуры (ОС). При необходимости формирования кодированной последовательности с большим количеством импульсов увеличивается число акустических каналов и, как следствие, число параллельно подключенных ВШП. В связи с этим импеданс входного преобразователя может быть неприемлемым для хорошего согласования с приемо-передающей антенной, что приведет к дополнительному затуханию импульсов информационного сигнала. Вопрос согласования входного преобразователя многоканальной конструкции с внешним волновым трактом был рассмотрен в работе [5].

При реализации многоканальной конструкции радиометки на ПАВ присутствуют потери, связанные с затуханием ПАВ при распространении, резистивные потери в ВШП и проводящих шинах, потери на дифракцию и потери в результате различных отражений и переотражений в акустических каналах. При увеличении информационной емкости подобных радиометок, часть ложных импульсов (импульсов двойного прохождения), образованных первой половиной ОС, попадет в информационный сигнал [4], поэтому необходимо проанализировать механизмы переотражений для снижения их влияния на информационный сигнал на стадии проектирования устройства.

Анализ физических механизмов переотражений в радиометках на ПАВ

В данном разделе рассмотрим основные типы паразитных отражений и переотражений, которые необходимо учитывать при проектировании топологии устройства на ПАВ.

В конструкции (рис. 1) информационный код формируется путем частичного отражения импульса опроса от групп ОС, расположенных в одном акустическом канале. В данной конструкции необходимо использовать малые коэффициенты отражения ОС, чтобы энергия распределилась между всеми ин-

формационными символами в акустическом канале. Как было сказано выше, формирование кодированной последовательности импульсов информационного сигнала в случае амплитудной модуляции происходит путем наличия («1») или отсутствия («0») ОС на соответствующем временном интервале.

На примере сигнала тройного отражения (рис. 1), становится ясно, что формируемый им импульс по времени задержки может совпасть с одним из информационных импульсов. Это не только влияет на неравномерность информационной посылки, но и ухудшает динамический диапазон между сигналами «1» и «0» в случае амплитудной модуляции. При этом в случае наличия ложного сигнала на месте отсутствующего информационного импульса «0» с амплитудой, превышающей заданный уровень, системой обработки информационного сигнала приемным устройством он может быть интерпретирован как информационный импульс «1», следовательно, будет получен недостоверный результат идентификации.

При реализации многоканальной конструкции (рис. 2) ОС в каждом акустическом канале располагаются по обе стороны ненаправленного ВШП, тем самым в каждом акустическом канале можно сформировать два информационных символа. Поскольку с одной стороны преобразователя формируется только один информационный символ, то можно использовать большие коэффициенты отражения для ОС при формировании кодированной последовательности, в отличие от конструкции, представленной на рис. 1. В многоканальной конструкции сталкиваемся еще с несколькими типами ярко выраженных паразитных сигналов. Первый – сигнал двойного и последующих проходов (рис. 3а).

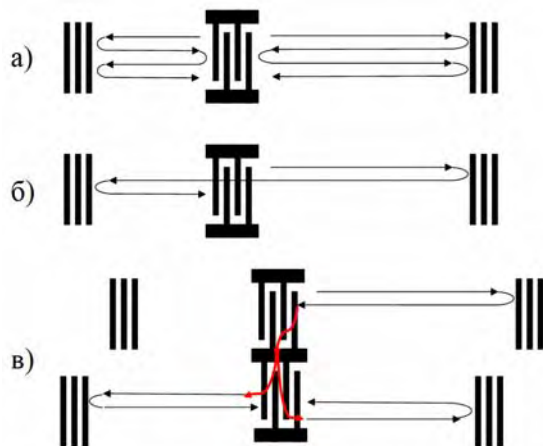


Рис. 3. Физические механизмы формирования паразитных сигналов в акустических каналах радиометки: а – сигнал двойного прохода; б – паразитного сигнала от смежного символа; в – межканальный паразитный сигнал

Для каждого информационного символа присутствуют сигналы двойного, тройного и последующих проходов, поскольку, в силу ненаправленности ВШП, часть мощности всегда отражается. Кроме

сигнала двойного прохода присутствует еще паразитный сигнал, обусловленный тем, что ненаправленный (входной/выходной) преобразователь пропускает через себя отраженный от отражательной структуры сигнал в сторону ОС, расположенной в этом же акустическом канале, формирующей другой информационный символ (рис. 3б). Помимо описанных выше паразитных сигналов, есть еще один ложный межканальный сигнал. Принцип его формирования показан на рис. 3в.

Расчет тестовой структуры одного канала радиометки

Проведем моделирование импульсного отклика тестовой структуры радиометки методом связанных мод (COM-методом) в программном пакете COMSOL Multiphysics для одного акустического канала многоканальной конструкции, представленной на рис. 2.

Для проведения расчета тестовой структуры используем метод моделирования, основанный на модифицированных уравнениях для связанных мод [7].

Используемый метод расчета основан на рассмотрении в структуре устройства двух однородных плоских волн, распространяющихся во встречных направлениях:

$$R(z, \omega) = R(\omega) \cdot \exp(-j\omega z), \quad (1)$$

$$S(z, \omega) = S(\omega) \cdot \exp(+j\omega z), \quad (2)$$

где $R(\omega)$, $S(\omega)$ – комплексные амплитуды поверхностных потенциалов с волновым числом k и круговой частотой ω , имеющие значения поверхностных электрических потенциалов.

При распространении ПАВ в периодической электродной структуре имеют место процессы их отражения и преобразования. Присутствие электродов на поверхности меняет скорость распространения волн и обуславливает взаимную связь между волнами. Отметим две причины: первая – частичное отражение ПАВ от электродов и вторая – возбуждение ПАВ посредством высокочастотного тока, протекающего в металлических электродах.

Можно записать уравнения, связывающие комплексные амплитуды ПАВ на входе $R_K(\omega)$, $S_K(\omega)$

и выходе $R_{K+1}(\omega)$, $S_{K+1}(\omega)$ K -го элемента структуры, и уравнение для тока через K -й электрод $I_K(\omega)$. Для формализации процесса вычисления, уравнения связанных волн удобно представить в матричной форме [8]:

$$\begin{bmatrix} S_K(\omega) \\ R_{K+1}(\omega) \\ I_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^K(\omega) & P_{12}^K(\omega) & P_{13}^K(\omega) \\ P_{21}^K(\omega) & P_{22}^K(\omega) & P_{23}^K(\omega) \\ P_{31}^K(\omega) & P_{32}^K(\omega) & P_{33}^K(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_K(\omega) \\ S_{K+1}(\omega) \\ U_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Эквивалентную акустоэлектрическую схему тестовой структуры радиометки с ОС можно представить в виде, приведенном на рис. 4.

Результаты расчета импульсного отклика, полученного с помощью метода связанных мод, представлены на рис. 5.

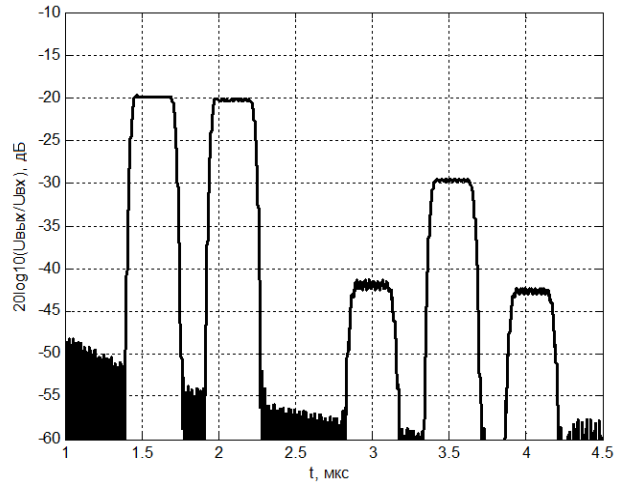


Рис. 5. Результат расчета импульсного отклика, полученного с помощью метода связанных мод

Как видно из рис. 5, кроме двух информационных символов присутствуют сигналы двойного прохода (время задержки 3 и 4 мкс соответственно) и паразитный сигнал от смежной ОС (время задержки 3,5 мкс).

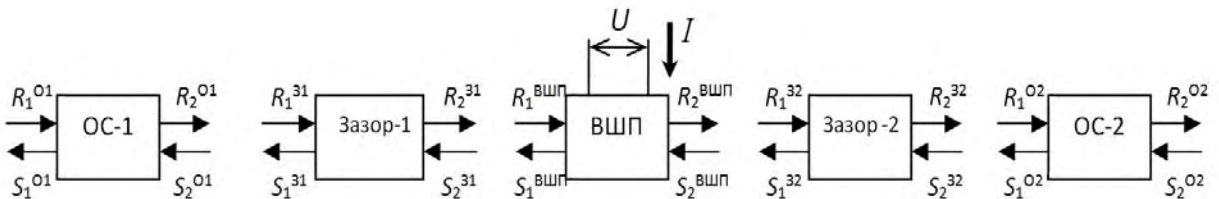


Рис. 4. Эквивалентная акустоэлектрическая схема тестовой структуры

Конструкция ПАВ-радиометки на основе МПО

Снижения влияния переотражений и увеличения отношения «сигнал/шум» можно достичь при реализации конструкции, представленной на рис. 6.

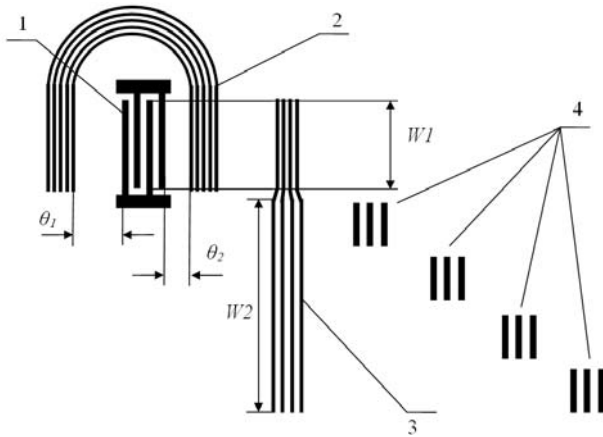


Рис. 6. Конструкция ПАВ-радиометки на основе МПО: 1 – входной ВШП; 2 – U-образный многополосковый ответвитель (МПО) с равным делением энергии; 3 – многополосковый ответвитель (компрессор); 4 – ОС

В качестве входного элемента, преобразующего радиоимпульс в ПАВ, используется однонаправленный преобразователь, обеспечивающий максимальное излучение энергии в заданном направлении. Чтобы реализовать однонаправленное распространение ПАВ, ВШП устанавливается между двумя плечами U-образного многополоскового ответвителя (МПО) с равным делением энергии так, чтобы выполнялось условие $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$. В этом случае волна, возбуждаемая ВШП и распространяющаяся в противоположных направлениях, достигает электродов U-образного МПО с разными фазовыми задержками, зависящими от положения преобразователя внутри ответвителя, обеспечивая, тем самым, однонаправленное излучение.

Ключевым элементом, позволяющим увеличить динамический диапазон между «0» и «1», является МПО, обеспечивающий полный перенос энергии, излученной входным преобразователем, из акустического канала апертуры W_1 , сформированного ВШП, в акустический канал апертуры W_2 , где установлены ОС, формирующие идентификационную кодированную последовательность импульсов (рис. 6). Апертура W_2 определяется требованиями к обеспечению необходимой информационной емкости радиометки, т. е. количеством ОС. Полная передача энергии из одного канала в другой обеспечивается при выполнении условия

$$d_1 - d_2 = \frac{\lambda(d_1 + d_2)}{4L_T} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}, \quad (4)$$

где L_T – длина МПО, d_1, d_2 – ширина зазора между электродами МПО с апертурами W_1 и W_2 соответственно.

При выполнении условия (4) обеспечивается полный перенос энергии ПАВ из одного канала в другой, когда длина МПО равна:

$$L_T' = L_T \frac{W_1 + W_2}{2\sqrt{W_1 W_2}}. \quad (5)$$

Максимальное подавление импульсов двойного прохождения достигается за счет того, что акустическая энергия, переизлученная МПО, достигает ОС и делится на N каналов, число которых соответствует количеству ОС. В случае отражения от входного преобразователя, акустическая энергия еще раз делится на N каналов, что позволяет обеспечить подавление импульсов двойного прохождения до 25 дБ.

Для исключения возможности попадания энергии ПАВ, сформированных ОС, из одного акустического канала в другой, на стадии проектирования радиометки обеспечивается их пространственное разнесение с учетом дифракционной расходимости ПАВ, излученных отражательными структурами. Минимальное расстояние от входного преобразователя до ближайшей отражательной структуры определяется из условия обеспечения достоверной идентификации объекта.

Радиометка работает следующим образом: при подаче радиоимпульса опроса на входной ВШП 1, генерируется ПАВ, распространяющаяся от преобразователя в противоположные стороны. При достижении ПАВ электродов U-образного МПО с фазовой задержкой $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$, реализуется однонаправленное излучение ПАВ (суммирование двух волн, первоначально излучаемых ВШП 1 в противоположных направлениях) в акустическом канале апертуры W_1 , определяемой апертурой ВШП 1 с учетом дифракционной расходимости [4]. Полная энергия ПАВ, излученная в одну сторону и имеющая апертуру W_1 , достигает многополоскового ответвителя (компрессора) 3, обеспечивающего полный перенос акустической энергии, излученной входным преобразователем, из акустического канала апертуры W_1 в акустический канал апертуры W_2 , определяемой требованиями обеспечения информационной емкости радиометки (количества ОС). Достигнув ОС, акустическая энергия ПАВ в акустическом канале апертуры W_2 делится на N каналов, число которых соответствует количеству ОС, формирующих информационный сигнал. Отраженные волны, сформированные, в свою очередь ОС, возвращаются с определенными временными задержками на компрессор, где их энергия переносится в акустический канал апертуры W_1 и далее приходит на входной ВШП 1, где преобразуется в радиоимпульс, содержащий кодированный информационный сигнал.

Предлагаемая конструкция позволяет полностью исключить электрическое взаимодействие между акустическими каналами, что существенно уменьшает степень взаимных искажений импульсов информационного сигнала. Динамический диапазон между идентификационными «0» и «1» позволяет обеспечить максимальную различимость импульсов информационного сигнала при осуществлении его дальнейшей обработки. Так же к достоинствам предлагаемой конструкции относятся небольшие размеры пьезоэлектрической подложки, позволяющие обеспечивать компактность конечного изделия (радиометки).

На рис. 7 и 8 показаны импульсные отклики экспериментального образца, изготовленного на подложке 128°YX -среза LiNbO_3 , содержащей 18 ОС. Выравнивание импульсного отклика по амплитуде осуществлялось за счет увеличения апертуры ОС на больших временах задержки.

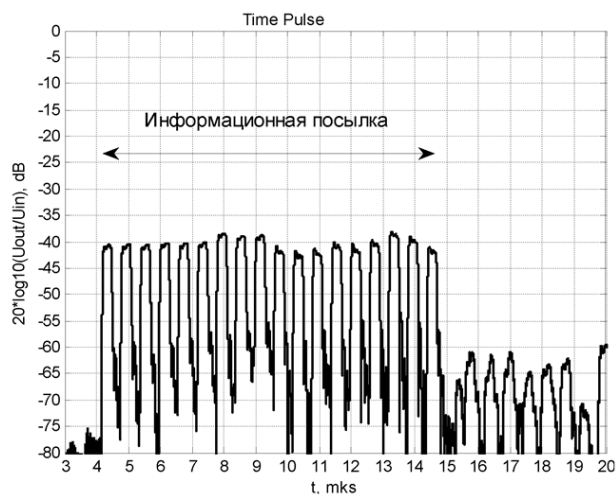


Рис. 7. Импульсный отклик экспериментального образца. Все импульсы – «1»

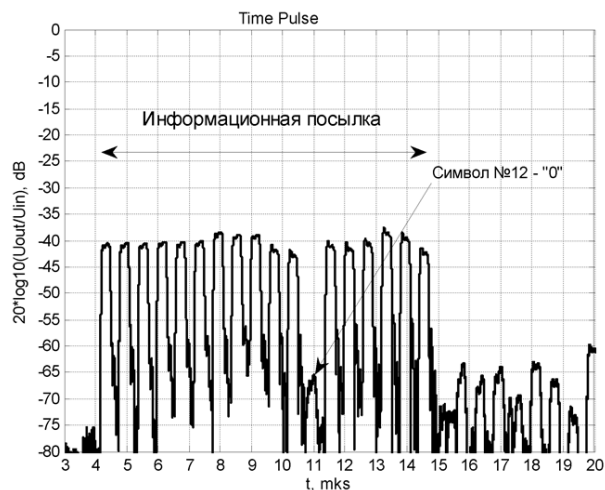


Рис. 8. Импульсный отклик экспериментального образца. Информационный символ № 12 – «0» при амплитудном кодировании

Анализ основных параметров изготовленных радиометок на ПАВ по импульсному отклику показал, что минимальные вносимые потери не превышают значения 38 дБ. Уровень неравномерности амплитуды в измеренном импульсном отклике не превышает значения 5 дБ. Уровень ложных сигналов не менее 23 дБ. Таким образом, новая уникальная конструкция позволяет работать с ОС с большим коэффициентом отражения и получить динамический диапазон не менее 23–25 дБ по ложным сигналам. Новая конструкция за счет применения ответвителя минимизирует все акустические отражения и перетражения, присущие «классической» схеме многоканальной метки и способна работать на любых временных задержках, без опасности влияния ложных сигналов.

Предлагаемая конструкция радиометки на ПАВ может быть использована в транспондере, осуществляющем идентификацию и регистрацию воздействия дестабилизирующих факторов на охраняемый объект, если в качестве ОС использовать ВШП.

Заключение

Показан физический механизм формирования паразитных/ложных импульсов, вызванных перетражениями ПАВ от отражательных структур радиометки. Представленная модель импульсного отклика тестовой структуры, состоящей из одного акустического канала, позволяет проводить учет влияния паразитных импульсов на стадии проектирования акустоэлектронных устройств.

Результаты, полученные при проектировании многоканальной радиометки, позволяют решать задачи по практической реализации систем дистанционной идентификации объектов, построенных на транспондерах.

В реализованной конструкции многоканальной ПАВ-радиометки на основе МПО увеличено отношение «сигнал/шум», что упрощает обработку информационного сигнала и позволяет увеличить дальность действия системы дистанционной идентификации и контроля.

Литература

1. Reindl L., Ruile W. Programmable Reflectan for SAW-ID-Tags. // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. 1993. P. 125–130.
2. Plessky V. P., Kondratiev S. N., Stierlin R., Nyfeler F. SAW Tags: New Ideas. Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1995. P. 117–120.
3. Пат. 2522886, РФ, С2. Многоканальная отражательная линия задержки на поверхностных акустических волнах / Дорохов С. П., Князев И. А., Салов А. С. // Бюл. 2014. № 20.
4. Дорохов С. П., Козлов В. А., Салов А. С. Оптимизация конструкции многоканальной ОЛЗ на ПАВ // Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 2. С. 22–26.

5. Дорохов С. П. Многопараметрический транспондер на основе пассивной радиометки на поверхностных акустических волнах // Датчики и системы. 2018. № 11. С. 35–41.

6. Campbell C. K. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. Boston: Academic Press, 1998. P. 631.

7. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических

волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.

8. Бальшева О. Л., Григорьевский В. И., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д. Акусто-электронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования. Под ред. академика РАН Гуляева Ю. В. М.: Радиотехника, 2012. С. 576.