

Прецизионные устройства на поверхностных акустических волнах для современных систем радиолокации, связи и телекоммуникации. Резонаторы и дисперсионные линии задержки

А.С. Койгеров¹, В.Р. Реут²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²ООО «АЭК Дизайн»

Аннотация: исследованы два класса устройств на поверхностных акустических волнах – двухпортовые резонаторы и дисперсионные линии задержки. Приведены основные характеристики резонатора – вносимое затухание, добротность и уровень фазовых шумов резонатора в составе автогенератора. Представлены измерения, выполненные в составе макета малошумящего автогенератора на 896 МГц, которые демонстрируют уровень фазового шума -135 дБ/Гц при отстройке 1 кГц и -175 дБ/Гц при отстройке 100 кГц от несущей частоты. Представлены характеристики дисперсионных линий задержек, способных обеспечить сжатие сигналов с линейной частотной модуляцией длительностью от 170 нс до 9 мкс с различными значениями девиации частоты, что потенциально существенно расширяет области их применения (радиолокация, анализаторы спектра, защищенная связь).

Ключевые слова: резонатор на ПАВ, STW, кварц, фазовые шумы, дисперсионная линия задержки, сжатие импульсов, ниобат лития

1. Введение

В настоящее время устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (полосовые фильтры, линии задержки, резонаторы и т.д.) находят широкое применение в различной аппаратуре систем связи, радиолокации и телекоммуникации [1]. Широкое распространение данные устройства получили в диапазоне от десятков мегагерц до 2.5-3 ГГц [2]. Область технических применений устройств акустоэлектроники постоянно развивается благодаря общей тенденции миниатюризации сложных радиоэлектронных комплексов и уникальным характеристикам приборов на ПАВ. Но в это же время ряд технологий и цифровая обработка сигналов составляют серьезную конкуренцию, а в некоторых направлениях и вытесняют с рынка. Поэтому исследование и разработка устройств на ПАВ с предельно возможными характеристиками остается актуальным направлением, поскольку это позволяют выдерживать конкуренцию в некоторых областях применения устройств на ПАВ. Например, устройства на ПАВ по технологичности изготовления, простоте конструкции и параметрам *SWaP* [3] (*Size, Weight and Power* – размер (габариты), вес и мощность потребления) могут быть как минимум альтернативными решениями, выигрывать в себестоимости и доступны как для приобретения, так и для изготовления. Но в тоже время требуется прецизионное оборудование для обеспечения технологического процесса с точностью воспроизведения критических размеров топологии до 9 нм (точность позиционирования по координате в составе решетки электродов).

Для иллюстрации важности и актуальности приборов с предельно возможными для своего класса параметрами приведем несколько характерных примеров применения устройств на ПАВ.

Во-первых, резонаторы для опорных и управляемых генераторов в качестве ключевых элементов автогенераторов (АГ) - модулей стабилизации в системах радиолокации, радионавигации и связи [4]. Уровень фазового шума – важнейший показатель качества СВЧ-автогенераторов [5]. Малошумящие АГ являются критически необходимым условием для обеспечения динамического диапазона в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) в тракте радиоприемных устройств. Отметим, что несущая частота, как правило, часто преобразуется в более высокую частоту при помощи различных конверторов и смесителей. Однако при умножении, например, кварцевых ВЧ-генераторов ухудшается уровень фазовых шумов (при умножении со 100 МГц до 800 МГц ухудшение составляет минимум 18 дБ). Если гетеродин, используемый в системе переноса частоты, имеет большую нестабильность, то его фазовый шум может маскировать полезный сигнал, что будет отрицательно сказываться на соотношении сигнал-шум, и, соответственно, ограничивать чувствительность и избирательность системы. Поэтому актуальным направлением является работа над генераторами на резонаторах на ПАВ, которые позволяют получать характеристики с малыми фазовыми шумами (минимальный уровень фазового шума -135 дБ/Гц при отстройке 1 кГц от несущей частоты и -175 дБ/Гц при отстройке 100 кГц от несущей) в совокупности с малыми габаритами. По мнению ряда экспертов, резонаторы на ПАВ превосходят аналоги – резонаторы на объемных акустических волнах (в том числе кварцевые резонаторы) по параметру произведения добротности на частоту [6].

Во-вторых, линии формирования и сжатия линейных частотных модулированных (ЛЧМ) импульсов на основе дисперсионных линий задержек (ДЛЗ). Несмотря на то, что многие из современных радиолокационных систем полагаются на цифровую обработку при сжатии импульсов, устройства сжатия на ПАВ потребляют меньше энергии и имеют высокий динамический диапазон, что может быть очень важным при построении портативных радаров и снижении массогабаритных показателей. Применение зависит от возможностей по реализации полос пропускания больше 500-600 МГц, длительности дисперсионной задержки от 100 нс до 20 мкс. Кроме традиционного использования в радиолокации ДЛЗ находят применение в системах с защищенной связью [7] и при построении анализаторов спектра на основе дисперсионно-временного метода анализа [8]. Успешно решается задача по уменьшению длительности ЛЧМ-сигнала и увеличению девиации частоты ЛЧМ-сигнала для специализированных применений.

2. Резонаторы на STW

Типовая экспериментальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) резонатора представлена на рис. 1. Основной тип волны – STW (Surface Transverse Waves - поверхностные поперечные волны). Материал пьезоэлектрической подложки – кварц. Материал металлических электродов – сплав алюминия и меди, что позволяет выдерживать подводимую пиковую мощность до +30 дБм. В таблице 1 представлены результаты измерений основных параметров резонаторов – вносимого затухания (A_0), нагруженной (Q_L) и ненагруженной (Q_{UL}) добротности в диапазоне рабочих частот (f_0) от 500 МГц до 2.2 ГГц. Как видно из таблицы, типовое произведение $f_0 \times Q_{UL}$ составляет значение 1.5×10^{13} , что сравнимо с лучшими известными мировыми аналогами [6]. Для оценки уровня собственных шумов в двухпортовых резонаторах использовался стенд или макет АГ на основе классического генератора Пирса. Измерения проводились в обычном помещении при помощи прибора Rodhe & Schwarz – FSWP. Фазовые шумы и джиттер генератора с резонатором A574-896M1 приведены

на рис. 2. Так, минимальный уровень фазовых шумов -175 дБ/Гц при отстройке 100 кГц от несущей частоты также соответствует лучшим образцам мирового уровня.

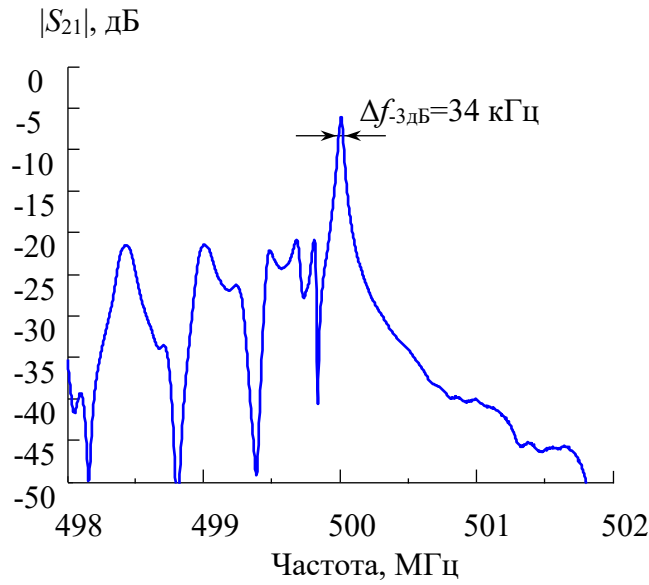
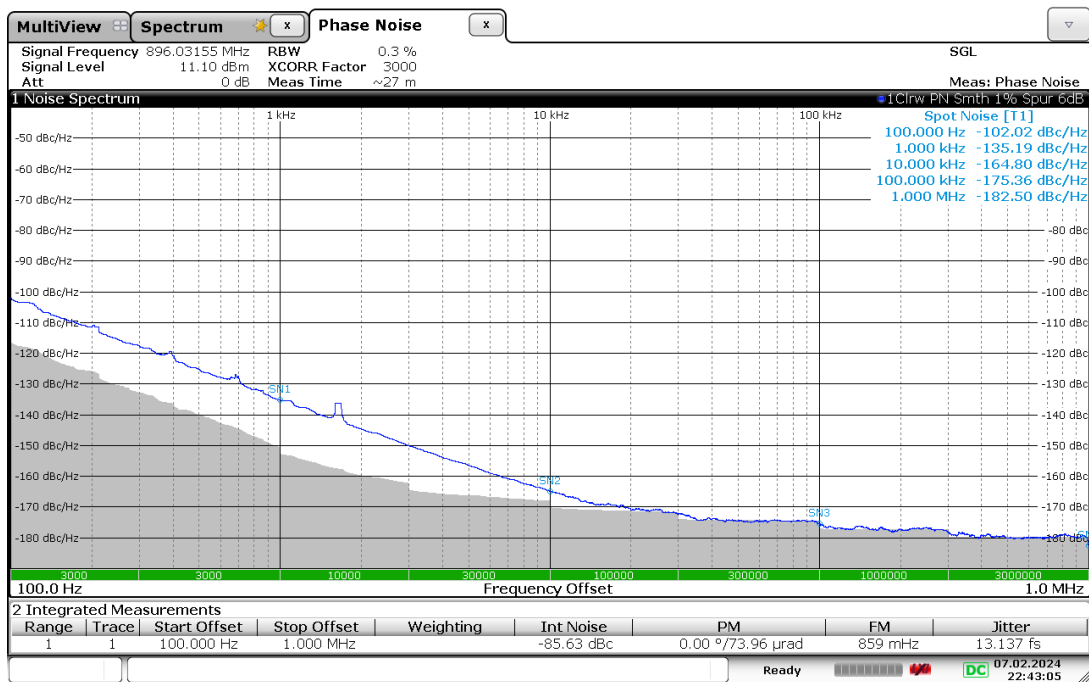


Рисунок 1. Экспериментальная АЧХ резонатора А574-500М1.

Таблица 1. Параметры образцов

Тип	f_0 , МГц	A_0 , дБ	Q_L	Q_{UL}	$f_0 \times Q_{UL}$
A574-500M1	500	6.1	14700	29000	1.50×10^{13}
A574-896M1	896	6.2	8870	17000	1.52×10^{13}
A574-1000M1	1000	6.4	8000	15000	1.50×10^{13}
A574-2240M1	2240	10	3700	5400	1.20×10^{13}



Date: 7.FEB.2024 22:43:05

Рисунок 2. Шумовые характеристики тестового АГ с резонатором А574-896М1.

3. ДЛЗ с большой дисперсионной длительностью

Типовая АЧХ и групповое время задержки (ГВЗ) ДЛЗ с длительностью дисперсионной задержки (Δt) 9 мкс представлена на рис. 3а. Форма отклика ДЛЗ на ЛЧМ-сигнал представлена на рис. 3б. Основной тип волны – волна Рэлея. Материал пьезоэлектрической подложки – ниобат лития. Материал металлических электродов – алюминий.

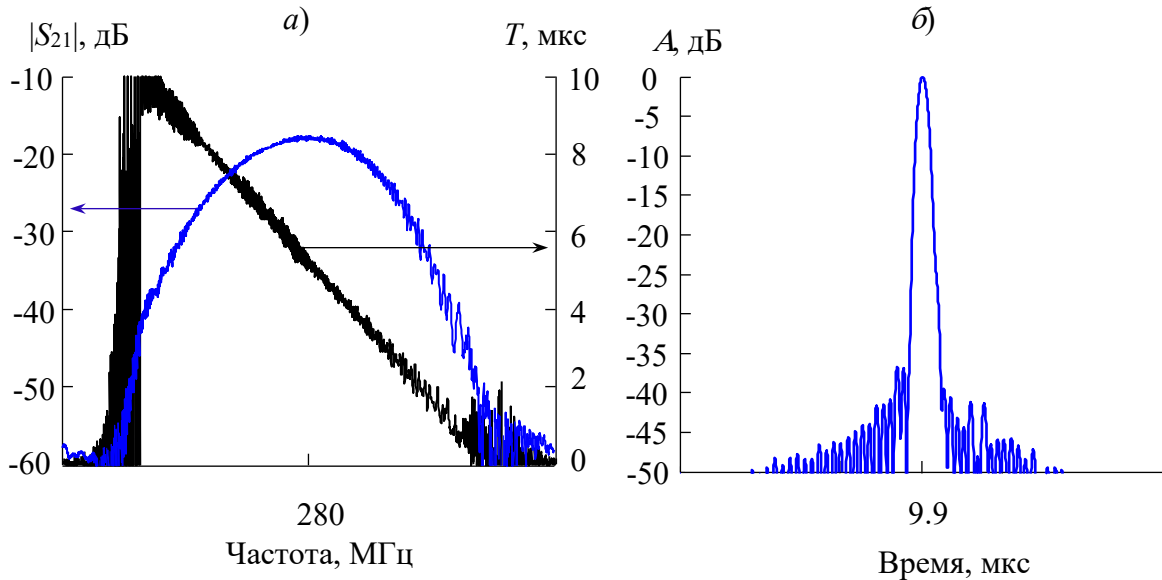
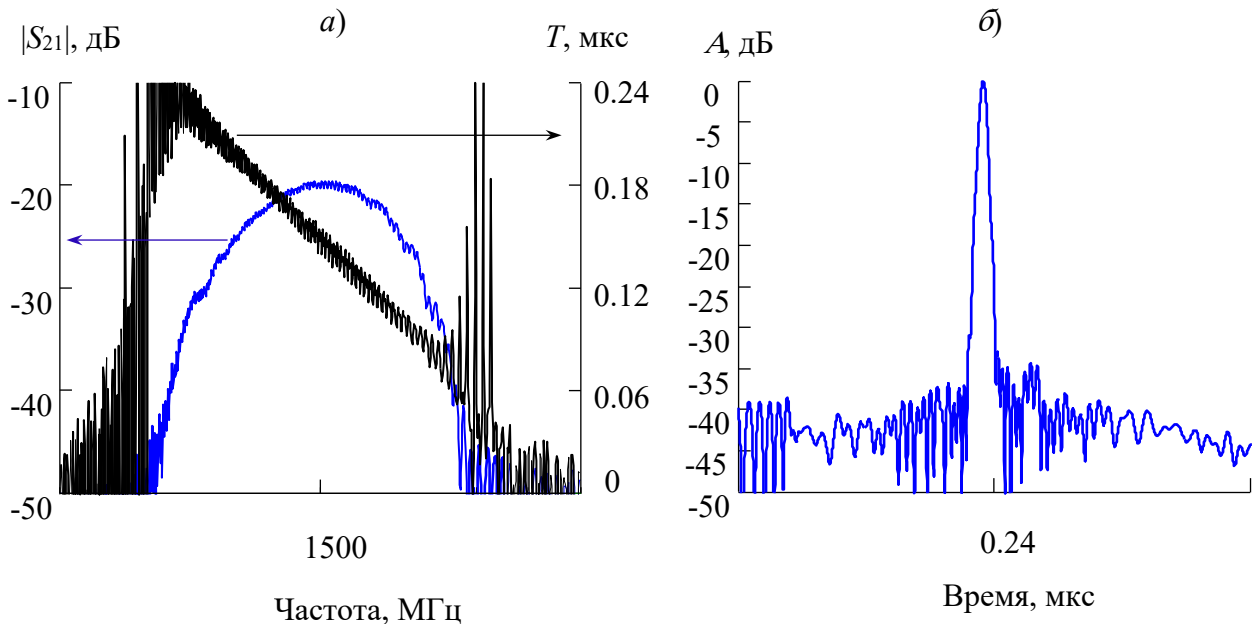


Рисунок 3. Типовые характеристики ДЛЗ: а – АЧХ и ГВЗ, б – сжатый импульс.

4. ДЛЗ с малой дисперсионной длительностью

Типовая АЧХ ДЛЗ с $\Delta t=170$ нс представлена на рис. 4а.

Рисунок 4. Типовые характеристики ДЛЗ: а – АЧХ и ГВЗ, б – сжатый импульс.



Форма отклика ДЛЗ на ЛЧМ-сигнал представлена на рис. 4б. Основной тип волны – волна Рэлея. Материал пьезоэлектрической подложки – ниобат лития. Материал металлических электродов – алюминий.

5. Заключение

Разработаны новые резонаторы с улучшенными шумовыми и ресурсными характеристиками. Успешные испытания при повышенной температуре и мощности открывают возможность применения STW технологии в ответственной аппаратуре связи, радиолокации, навигации. Анализ данных позволяют надеяться на дальнейшее улучшение шумовых параметров резонаторов и генераторов еще на 6-7 дБ за счет новой схмотехники и внедрения токовой тренировки. В сочетании с хорошими множителями частоты, это позволит проектировать и производить малогабаритные и недорогие генераторы с шумовой полкой до -170 дБм в X диапазоне. На данный момент лучшим вариантом для внедрения новых резонаторов является их применение в недорогих малощумящих ГУН на частоты 400-2400 МГц, в том числе с последующим умножением до 10-12 ГГц.

Представленные результаты по ДЛЗ показывают возможность реализации как больших дисперсионных временных задержек более 9 нс, так и малых менее 200 пс, что потенциально расширяет их область применения от радаров до помехозащищенных систем связи. А с учетом того, что системы сжатия импульсов на основе ДЛЗ на ПАВ потребляют меньше энергии и имеют более высокий динамический диапазон, чем полностью цифровые системы, то данное решение выглядит перспективным для реализации портативных радаров.

Приборы на ПАВ по технологичности изготовления, простоте конструкции и параметрам *SWaP* могут быть как минимум альтернативным решением при построении сложных современных систем радиолокации, связи и телекоммуникации.

Список литературы

1. Койгеров А. С. Достижение критических и предельных параметров в микроприборах на поверхностных акустических волнах // Нано- и микросистемная техника. – 2022. Т. 24. – №. 4. – С. 199–207.
2. Багдасарян А., Сеницына Т., Машинин О., Иванов П., Егоров Р. Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2013. – № 8. – С. 128–136.
3. Dufilie P., Valerio C., Martin T. Improved SAW Slanted Array Compressor Structure for Achieving > 20000 Time-Bandwidth Product // 2014 International Ultrasonics Symposium. Chicago. USA. – 2014. – pp. 2019–2022.
4. Лойко В. А., Добровольский А. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25. – № 3. – С. 6–21.
5. Ченакин А. Фазовые шумы в СВЧ генераторах // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. № 4. – С. 52–61.
6. Hay C. E., Harrell M. E., Kansy R. J. 2.4 and 2.5 GHz Miniature, Low-Noise Oscillators Using Surface Transverse Wave Resonators and a SiGe Sustaining Amplifier // 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Montreal. Canada. 2004. – pp. 174-179.
7. Springer A., Gugler W., Huemer M., Reindl L., Ruppel C.C.W., Weigel R. Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals // IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhanced Public Safety and Security. Munich. Germany. – 2000. – pp. 166–170.
8. Гуляев Ю. В., Медведь А. В. Устройства на поверхностных акустических волнах и их применение в радиоэлектронике (Обзор) // Изв. Высших учебных заведений. Радиофизика. – 1983. – Т. 26. – № 8. – С. 911–947.