

Обзор систем стабилизации и контроля кварцевых генераторов в современной донной сейсморазведке

- Казанин А.Г., Базилевич С.О., Зимовский А.В., Куома Д.Г., АО «МАГЭ», г. Москва
- Зиборов А.В., Долотказин И.Н., Кошелев Е.А., ООО «МТЦ», г. Санкт-Петербург
- Ерофеев Ю.Г., ООО «Моргеокомплекс», г. Мурманск

Автономность любого регистрирующего оборудования от информационного поля глобального времени, при записи условного события, всегда требует точной привязки данного события к метке времени для его дальнейшего воспроизведения. Чем более длительна и прерывиста автономная работа регистратора, тем стабильнее должны быть его внутренние часы. Роль таких часов в донной сейсморазведке выполняет генератор частоты каждого донного регистратора, от стабильности и точности которого, зависит работоспособность всего сейсмического комплекса. В настоящей статье рассматриваются перспективные направления стабилизации кварцевых часов регистраторов донных станций, аппаратных и программных алгоритмов контроля и коррекции частоты (ОСХО) кварцевых генераторов, а также времени сейсмической записи, на примере развития инновационного комплекса донной сейсморазведки «Краб».

Введение

Непрерывная сейсмическая запись, полученная с донной сейсморазведочной станции, в многоволновой сейсморазведке на акватории также как и с буксируемой косой имеет отметки начала и конца регистрации, но с одним существенным отличием - время начала записи в донном регистраторе не имеет прямой синхронизации с глобальным временем GPS (обычно UTC), так как донная станция в момент регистрации находится под водой [4]. Это означает что, каждая отметка времени включает в себя разницу между GPS временем и временем часов каждой станции (dt). При нормальных условиях работы генератора частоты или осциллятора для каждой последующей записи, dt будет линейно возрастать или отклоняться от времени GPS, данный эффект называется линейным дрейфом времени осциллятора. При единовременном поднятии со дна нескольких тысяч станций и последующей второй синхронизации времени часов станций с глобальным временем GPS, для каждой станции и отметки

времени начала записи (t_0) вводится поправка, полученная интерполяцией значений на полном временном интервале регистрации ($t_{start} - t_{end}$, первая - вторая синхронизации), которая позволяет привязать t_0 каждой сейсмической трассы к спутниковому эталону времени GPS [5]. В не модельных условиях после ввода такой поправки на сейсмической записи остаются остаточные смещения, состоящие из наложения собственного шума кристалла генератора и нелинейных отклонений времени $f_s(dt)$, которые зависят от целого ряда временных и конструктивных факторов. Если величина отклонений превышает половину шага дискретизации сейсмической записи тогда при накоплении ошибки и округлении, например в большую сторону, происходит смещение времени регистрации что может привести к фазовому сдвигу на сейсмической записи и искажению геологической информации. В действительности, при выполнении сейсмической съёмки 3D-4C с использованием часов донных станций на основе термостатированного кварцевого гене-

патора (ОСХО - Oven Controlled Crystal Oscillator) [2], максимальным временем жизни приемной расстановки из 3000 донных станций 2 месяца и дискретизацией записи 2 мс, линейный дрейф времени кристалла генератора не превышает $0.192 \cdot 10^{-10}$, то такая система времени считается стабильной и не требует коррекции [3]. Если значительный линейный дрейф времени можно скомпенсировать простой интерполяцией, то нелинейные отклонения частоты кристаллов требуют новых технических решений и использования математических алгоритмов. Причиной нелинейного дрейфа частоты для пьезоэлектрических осцилляторов является естественный процесс остаточного старения кристалла, огранка кристалла, его качество и чистота, влажность, радиация и даже гравитация. Гравитационная перегрузка также может навсегда изменить частоту генератора. Главной проблемой для осцилляторов остается изменение температуры, вызванное нестабильностью источника питания кристалла.

Как показывает опыт работ с донными станциями и глубоководными донными сейсмометрами большинство типов часов только с термостабилизацией кварца и схемой управления питанием, не подходят для получения кондиционных сейсмических материалов в случае привязки пунктов наблюдения к точным координатам, а не отработки пикетов сейсмического профиля по равным интервалам времени [1].

Общие тенденции развития алгоритмов контроля кварцевых генераторов в донной сейсморазведке

С начала 80-х годов прошлого столетия кварцевые генераторы с температурной компенсацией дрейфа пьезоэлектрических кристаллов (ТСХО-Temperature

Compensated Crystal Oscillator) активно использовались для морских сейсморазведочных работ КМПВ. Производители донных сейсмометров, увеличивая кратковременную стабильность частоты кристаллов (дисперсия Алана) с $3 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-8}$, и повышая точность до $1 \cdot 10^{-7}$, столкнулись с проблемой невозможности получения истинных значений температуры на поверхности кристалла и как следствие корректной обратной связи для компенсации возникающего дрейфа времени. Причиной данной проблемы была не совершенность используемых материалов и существующие на тот момент ограничения технологии сварки кристаллов. (ТСХО)- термокомпенсированные кварцевые осцилляторы, температурный уход частоты которых, скомпенсирован встроенной схемой обратной связи. Такая схема позволяла производить кварцевые генераторы с температурной нестабильностью в пределах от 0.5 ppm до 10 ppm в широком диапазоне температур. Генераторы с системой термической коррекцией потребляли минимум энергии; однако ТСХО не смогли обеспечить приемлемо низкую ошибку времени для длительной регистрации донной станции [6]. Для стабилизации температурного градиента стали производить генераторы с микроконтроллерной компенсацией температурного ухода частоты (МСХО-Microprocessor Corrected Crystal). В этом случае частота генератора контролируется микропроцессором и может быть скорректирована по определенной программе, такие генераторы также имеют индекс С (ССХО-Coefficient Corrected Crystal Oscillator).

Отвечая запросам рынка сейсморазведки конца 80-х и начала 90-х годов постепенно увеличивалось количество донного оборудования и возрастала

кратность двумерных систем наблюдений. Появились новые пленочные материалы и прецизионные технологии сварки кристаллов кварца, улучшилась герметичность упаковки кристалла и базовой микросхемы. В это же время происходило развитие технологии производства генераторов с управляемым подогревом кристалла (ОСХО). В термостатированных генераторах (ОСХО) благодаря нагреву поверхности кристалла через плату контроллера, конструкторам удалось на порядки улучшить стабильность частоты. Такие кварцевые генераторы включают в себя схему подогрева и устанавливаются в специальный корпус, что позволяет поддерживать рабочую температуру генератора постоянной и получать высокую стабильность частоты, вплоть до $\pm 0.1 \text{ ppb}$. В большинстве случаев, у термостатированных генераторов есть функция частотной подстройки, либо управляющим напряжением, либо механически. Так большинство современных высоко стабилизированных осцилляторов с индексом ОСХО имеет температурный датчик и схему обратной связи (TCVCXO Temperature Compensated/Voltage Controlled) а также систему контроля напряжением в цепи питания основного генератора (OCVCXO Oven Controlled/Voltage Controlled Crystal Oscillator), где в качестве источника питания используется автогенератор.

Кварцевые генераторы в эпоху зарождения донной сейсморазведки, потребляли более одного ватта мощности и поэтому были не способны выдерживать длительные сейсморазведочные работы из-за ограничений энергоемкости и внутреннего источника питания (опорного генератора) без подзарядки. Им на смену, были разработаны новые ОСХОs со значительно более низким энергопотреблением, обычно менее двухсот

милливатт, которые способны обеспечить значительное улучшение производительности в отношении уменьшения временных ошибок и работы с низким энергопотреблением.

Следующим значительным шагом в развитии ОСХО осцилляторов стало появление устройств с получением pps сигнала (pulse per second) из записи при уже состоявшейся ранее синхронизации осциллятора с источником точного времени. В ноябре 1997 года успешно завершилась первая 95-дневная миссия на Марс лунохода Sojourner частично укомплектованного осцилляторами французского концерна Syrnix из линейки Ewos. Тогда эта миссия показала возможность стабильной работы в космосе относительно недорогих кварцевых часов (GPSDXO-GPS Disciplined Crystal Oscillator) и послужила началом новой эры в разработке программных алгоритмов коррекции кварцевых генераторов в режиме удержания (без доступа к точным отметкам времени). Современная версия SGTm16 Ewos оснащена компактной платой встроенного генератора, что позволяет копировать сигнал pps с точностью до наносекунды. Эта функция синхронизации является основой производительности донного оборудования и его погружения в течение периода от нескольких недель до нескольких месяцев. Оказавшись под водой, встроенный модуль Sgtn вычисляет прошедшее время и обеспечивает синхронизацию и замену временного участка на участок модели времени, имеющей аналогичные температурные условия и профиль старения из встроенной памяти. В конце сейсмической съемки производится повторная синхронизация с истинным GPS временем, и часовой дрейф полного времени регистрации измеряется заново. После обработки этих данных вре-

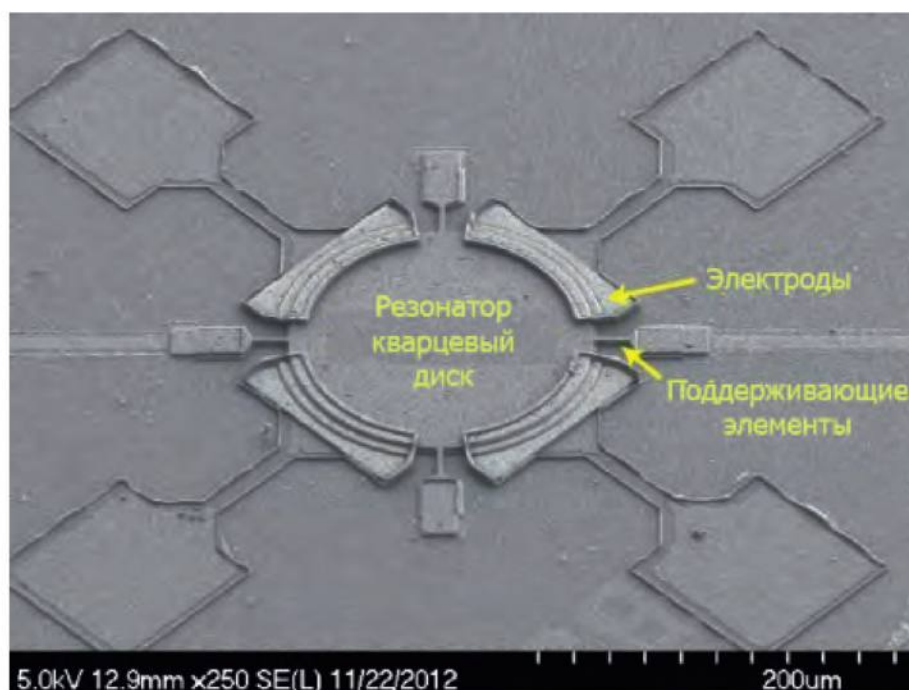


Рис. 1.
Микромеханическая
система осциллятора
типа Wine Glass
с использованием
кварцевого
актюатора.

менные дрейфы могут быть линейно или параболически скомпенсированы.

В 2005 году на рынке появились первые модели MEMS микромеханических осцилляторов, представляющих собой микромеханические машины, элементы которых вырезаны из пластин кремния или полимеров, а в качестве резонаторов могут быть использованы как микромеханика, так и газ или другие пластичные наполнители. Различают два основных типа MEMS осцилляторов:

1. Микромеханическое движение подвижного элемента системы преобразуется в электрический импульс;

2. MEMS система формирует электрический импульс с помощью подвижного актюатора, это могут быть зеркала для источников света, пьезоэлектрические элементы или сообщающиеся сосуды с мембранами для жидкости или инертного газа.

Тенденция к уменьшению MEMS-осцилляторов в совокупности с применением технологии печати микроэлектронных компонентов плат управления 90 нанометров и менее, открывает практи-

чески безграничные возможности по совершенствованию стабильности микромеханических систем. Например, MEMS-осцилляторы (1-125 МГц) 2006 года выпуска от компании SiTime имели размеры 2×2,5×0,85 мм. Резонаторы SiT 15xx (1-32 кГц, 2013 год) оказались на 85% меньше, в 15 раз надёжнее и на 50% экономичнее, чем кварцевые аналоги. Первый кремниевый МЭМС-резонатор, выполненный в пластмассовом корпусе SiT1052, позиционировался SiTime как заведомо бездефектный продукт. Наиболее перспективной принципиальной MEMS системой в плане реализации стабильности частоты и пригодности для донной сейсморазведки на данный момент времени является дисковая система типа Wine Glass с кварцевым ОСХО актюатором (рис.1).

Микромеханические осцилляторы имеют более сложную систему реализации, но пока их слабой стороной является значительный фазовый шум – джиттер, уступающий кварцевым осцилляторам. Тем не менее MEMS осцилляторы в 10-ки раз надёжнее и долговечнее кварцевых

систем и обладают колоссальным запасом прочности к перегрузкам. Стабильность MEMS осцилляторов растёт с каждым годом. На данный момент производителям удалось приблизиться к точности данных устройств до 2 ppm.

Беспрецедентной на данный момент времени остается стоимость MEMS осцилляторов что примерно в 100 раз меньше, чем у кварцевых и гибридных систем.

По мнению экспертов, MEMS-приборы

▼ Табл. 1. Сравнительные параметры осцилляторов .

	Кварцевые генераторы частоты и времени				Микромеханические кремневые генераторы	Атомные генераторы частоты и времени		
	ТСХО	МСХО	ОСХО	GNSS ОСХО (GPSDXO)	MEMS	Rubidium	RbXO	Cesium (CeXO)
Точность	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-11}$
Старение (в год)	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-11}$ ***	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-15}$
Температура стабилизация	$5 \cdot 10^{-7}$ (-55до+85)	$3 \cdot 10^{-8}$ (-55до+85)	$1 \cdot 10^{-9}$ (65до+85)	$5 \cdot 10^{-10}$ (-10до+45)	$1 \cdot 10^{-8}$ (-40до+105)	$3 \cdot 10^{-10}$ (-55до+68)	$5 \cdot 10^{-10}$ (55до+85)	$2 \cdot 10^{-11}$ (-28до+70)
Коротко временная стабильность	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	Возможна до $1 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-11}$
Размер (см ³)	10	30	20-200	5	0,1-20	200-800	500-1000	17-6000
Время прогрева	0.03 (до $1 \cdot 10^{-7}$)	0,03 (до $2 \cdot 10^{-8}$)	4 (до $1 \cdot 10^{-8}$)	4 (до $1 \cdot 10^{-8}$)	0.03 (до $1 \cdot 10^{-6}$)	3 (до $5 \cdot 10^{-10}$)	3 (до $5 \cdot 10^{-10}$)	20 (до $2 \cdot 10^{-11}$)
Потребляе мая энергия	0.04	0.04	0.09-0.6	0.105	0.14	2-20	0.4-0.65	0.15-0.30
Стоимость (\$США)	10-100	<1000	200-2000	2000-4000	1-200	2000-8000	<4000	<6000

***-Для MEMS генераторов с кварцевым актюатором.

способны вытеснить с рынка менее компактные и устойчивые к механическому шоку и вибрации, но более дорогие кварцевые осцилляторы. Благодаря разработке упаковки, совместимой с традиционной CMOS-архитектурой, новые MEMS-устройства активно приобретаются компаниями, замещая кварц кремнием в технологиях синхронизации.

Другие типы источников времени, такие как атомные часы с чип-шкалой (CSAC) активно начали применяться в донной сейсморазведке с 2008 года. CSAC способны значительно снизить временную ошибку, но все же потребляют в два-три раза больше энергии, чем последние версии кварцевых генераторов ОСХО, а также в несколько раз отличаются по стоимости.

В таблице №1 представлены сравнительные параметры ранее представленных осцилляторов.

Заключение

Термостатированный кварцевый осциллятор сегодня это отлаженная десятилетиями разработок и поиска инновационных решений, система генерации точных сигналов времени. Точность новых модификаций термостатированного кварцевого генератора ОСХО постепенно приближается к атомным часам и уже составляет $1 \cdot 10^{-10}$. В данной статье рассмотрена научно-техническая проблема, которая заключается в стабилизации и контроле кварцевых генераторов в современном донном сейсморазведочном оборудовании, а также показана история развития кварцевых генераторов в Российской Федерации. Подводя итог, можно сказать, что несмотря на интенсивное развитие и повышение стабильности новых MEMS осцилляторов, а также внедрение в отрасль более дорогих атомных цезие-

вых часов, термостатированный кварцевый осциллятор остается на сегодняшний день самым доступным и востребованным измерителем времени и синхронизатором тактовых сигналов для решения задач современной донной сейсморазведки.

Список литературы:

1. Бескаравайный Ю. М. Патент RU 2 607 414 C2. Автоматический контроль качества работы кварцевых генераторов, дублирование при сбоях, индикация, подавление высших гармоник сигнала. – 2017.
2. Казанин А.Г., Базилевич С. О., Куома Д. Г. и др. Инновационный цифровой сейсмический комплекс морской сейсморазведки "Краб". Разработка, внедрение и перспективы развития отечественных донных станций // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 12(253). – С. 28-35.
3. Лаверов Н. П. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. – 2011. – №. 4. – С. 4-13.
4. Левченко Д. Г. и др. Способ регистрации сейсмосигналов на акватории моря и устройство для его осуществления. – 2006.
5. Рей К. Х. и др. Способ и устройство для регистрации сейсмических данных. – 2011.
6. Самойлов К. Н., Альтшуллер Г. Б. Кварцевый генератор. – 2003.