

УДК 621.373.121.1

© А. П. Загороднов, А. Н. Якунин

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МАЛОШУМЯЩЕГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Рассматриваются вопросы построения малошумящего опорного генератора для высокочувствительных РЛС на основе различных типов резонаторов: кварцевых, на основе ПАВ и HBAR. На основе сравнительного анализа показана перспективность применения резонаторов на основе объемных акустических волн. Выявлены проблемы построения генераторов на основе HBAR, связанные с высоким ТКЧ резонатора. Предложен метод термостабилизации HBAR на основе цифровой частотной автоподстройки частоты.

Кл. сл.: радиолокация, резонатор, пав, HBAR, автоподстройка частоты

ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиосистем СВЧ, использующих когерентную обработку сигналов, выдвигает все более жесткие требования к фазовой стабильности излучаемого колебания и сигнала гетеродина. Типичным примером подобных радиосистем могут служить современные радиолокационные станции (РЛС) военного назначения, которые аккумулируют результаты многолетних интенсивных исследований и разработок, что обеспечивает их высокую эффективность в большинстве ситуаций. Вместе с тем военные конфликты последних лет с участием США наглядно показали, что технические возможности серийных РЛС не обеспечивают надежное обнаружение летательных аппаратов, выполненных по технологии "stealth", и ряда других малозаметных объектов. Трудности обусловлены исключительно малой эффективной поверхностью отражения (ЭПО) этих целей, составляющей менее 0.1 кв. м [1].

Решающую роль в определении минимального значения ЭПО цели для конкретной РЛС при заданных условиях работы играет уровень фазовых шумов излучаемого сигнала. Принципиальный характер именно этого фактора обусловлен помимо всего прочего неидеальностью развязки между передатчиком и приемником РЛС, вследствие чего шумовой спектр сигнала передатчика проникает на вход приемника, образуя фон, маскирующий слабое отражение от цели. Основной вклад в уровень фазового шума выходного сигнала СВЧ передатчика дают фазовые флуктуации опорного (задающего) генератора (ОГ) передатчика.

ТРЕБОВАНИЯ К ОПОРНЫМ ГЕНЕРАТОРАМ ДЛЯ РЛС

По имеющимся оценкам [1] граница обнаружения целей класса "stealth" соответствует уровню шума -130 дБ/Гц при отстройке от несущей на 1 кГц, а их уверенная индикация возникает при $(-135) \div (-140)$ дБ/Гц. Сходные проблемы с фазовыми шумами имеют место также в некоторых современных системах связи и радионавигации.

Воздействие фазовых шумов особенно вредно для радиолокационных селекторов движущихся целей [2]. При отражении от движущейся цели благодаря эффекту Доплера частота сигнала меняется тем сильнее, чем выше скорость цели. Как правило, сигнал, отраженный от цели имеет значительно меньшую мощность, нежели мешающий сигнал, отраженный от поверхности (земля, горы, здания). Так как мешающий сигнал имеет частоту, отличную от частот движущихся объектов, он отфильтровывается и анализируются сигналы, отраженные от цели. Однако фильтр не может отделить шумы на мешающих отражениях от полезного сигнала. Это может привести к скрытию сигнала от цели за счет уменьшения соотношения сигнал/шум и к детектированию ложных целей.

Из вышесказанного можно сделать вывод о необходимости построения высокочастотных ОГ с фазовым шумом менее -140 дБ/Гц на отстройке 1 кГц. При этом следует минимизировать шум как на малой отстройке от несущей частоты для обнаружения низкоскоростных целей, так и на большой отстройке для обнаружения высокоскоростных целей. Кроме того, уменьшение уровня шума

в широкой полосе увеличивает соотношение сигнал/шум, что повышает разрешающую способность радиолокатора.

Известно, что для снижения спектральной плотности шума необходимо увеличение добротности резонатора [3]. В связи с этим развитие современной техники микроволнового диапазона требует разработки высокодобротных резонаторов, являющихся основным компонентом высокочастотных (порядка 1–2 ГГц) опорных генераторов. Рассмотрим возможность применения различных высокодобротных видов резонаторов.

КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Наиболее широко при построении ОГ применяются кварцевые резонаторы [4]. Кварцевый резонатор представляет собой пластинку, кольцо или брусок, вырезанные определенным образом из кристалла кварца. При деформации кварцевой пластинки на ее поверхности вследствие пьезоэффекта появляются электрические заряды, величина и знак которых зависят от величины и направления деформации. В свою очередь, появление на поверхности пластины электрических зарядов вызывает ее механическую деформацию. В результате этого механические колебания кварцевой пластины сопровождаются синхронными колебаниями электрического заряда на ее поверхности и наоборот. Подача сигнала на пластинку кварца осуществляется посредством пары электродов, напыляемых с двух сторон пластины.

У генераторов на основе такого типа резонаторов [5] удается получить весьма низкий уровень фазовых шумов: -125 дБ/Гц при отстройке от несущей 100 Гц; -165 дБ/Гц при отстройке от несущей 10 кГц и более. Однако основная резонансная частота обладающих максимальной добротностью кварцевых резонаторов не превышает 100–150 МГц [6], что ведет к необходимости многократного умножения их частоты схемотехническими решениями для достижения более высоких частот. Это вызывает значительное увеличение уровня фазовых шумов (приблизительно на 6 дБ при каждом акте удвоения частоты) и делает применение резонаторов данного типа малоперспективным при построении высокочастотных опорных генераторов.

РЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В последние годы при конструировании опорных генераторов получили распространение резонаторы на основе поверхностных акустических волн (ПАВ).

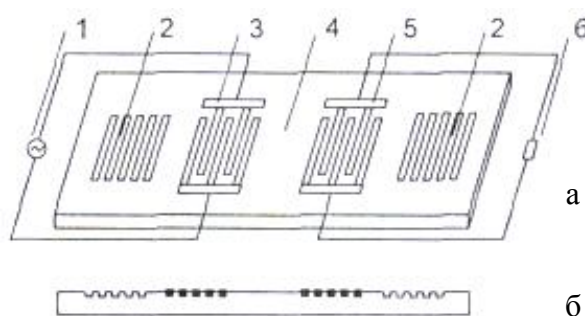


Рис. 1. Структура ПАВ-резонатора.

а — вид «в плане», б — вид «в профиль», 1 — источник переменного напряжения, 2 — отражательные решетки, 3 — входной ВШП, 4 — пьезоэлектрическая пластина, 5 — выходной ВШП, 6 — нагрузка

Основой резонатора ПАВ [7] является кварцевая пластина, вырезанная из монокристалла кварца. На поверхность кварцевой пластины нанесен тонкий слой металла. Чаще всего используется алюминий. В металле с использованием фотолитографии сформирована структура резонатора, состоящая из одного или двух встречно-штыревых преобразователей (ВШП) и двух отражательных решеток (рис. 1) [8].

Электрический высокочастотный сигнал посредством преобразователей создает на поверхности кварца механические (акустические) колебания, распространяющиеся в виде волн. Такая волна получила название «поверхностная акустическая волна». Скорость ПАВ в кварце в 10^5 раз меньше скорости электромагнитной волны. Максимальная эффективность преобразования достигается на частоте синхронизма, т. е. на такой частоте подводимого электрического сигнала, когда длина волны акустических колебаний совпадает с пространственным периодом электродов преобразователя.

Две решетки на частоте синхронизма работают как два зеркала, отражая акустическую волну. За счет сохранения и накопления энергии механических колебаний в области между решетками на резонансной частоте образуется высокодобротная колебательная система. Длина всей системы составляет несколько сотен длин волн.

Такие резонаторы имеют высокую частоту (до 2000 МГц) основной гармоника и возможность получения более высокой выходной мощности генератора. Использование основной гармоника позволяет также существенно понизить уровень фазовых шумов генератора. Так, уровень относительных фазовых шумов генератора на 500 МГц оставляет -145 дБ/Гц при отстройке на 1 кГц и -184 дБ/Гц при отстройке на 100 кГц и более.

РЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Еще одним перспективным направлением является применение резонатора на основе объемных акустических волн (HBAR — High Overtone Bulk Acoustic Resonator). Резонатор данного типа представляет собой подложку, называемую звукопроводом, с нанесенными на нее пленками пьезоэлектрика, например ZnO, и двух электродов, как показано на рис. 2 [9]. При подаче на электроды СВЧ-сигнала в пленке возбуждаются объемные акустические волны, которые распространяются в звукопроводе. Звукопровод толщиной ~ 100 мкм является высокодобротным резонатором Фабри—Перро с густым спектром резонансных частот f_n с шагом 1–10 МГц:

$$f_n = \frac{nv}{2d},$$

где v — скорость звука в материале подложки, d — ее толщина, n — номер моды.

Резонаторы на основе объемных акустических волн могут иметь резонансные частоты от 300 МГц до нескольких гигагерц, что делает возможным их применение без использования дополнительных умножителей. Кроме того, подобный резонатор, изготовленный на кристалле сапфира, обладает добротностью, в несколько раз превосходящей добротность кварцевых резонаторов той же частоты. Уровень фазовых шумов для генера-

торов на основе HBAR [10] составляет -123 дБ/Гц при отстройке от несущей 100 Гц; -160 дБ/Гц при отстройке от несущей 10 кГц и более.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗОНАТОРОВ

Для удобства сравнительного анализа на рис. 3 приведены характеристики относительных уровней фазовых шумов для генераторов на основе рассмотренных выше типов резонаторов. Кривые построены для генератора с частотой 1 ГГц. Кварцевый резонатор с основной резонансной частотой 100 МГц требует умножения частоты в 10 раз, в результате чего получается следующий уровень относительных фазовых шумов: -106 дБ/Гц при отстройке от несущей 100 Гц и -146 дБ/Гц при отстройке от несущей 10 кГц и более. Характеристики остальных типов резонаторов взяты без изменений.

Из анализа кривых, приведенных на рис. 3, видно, что резонаторы на основе HBAR имеют определенные преимущества перед другими видами резонаторов. Так, их уровень шума ниже уровня шума кварцевых резонаторов после умножения частоты как в ближней (от 100 Гц до 10 кГц), так и в дальней (>10 кГц) зоне. Резонаторы на ПАВ имеют более низкий уровень шума в дальней зоне, однако в ближней зоне их шум недопустимо велик.

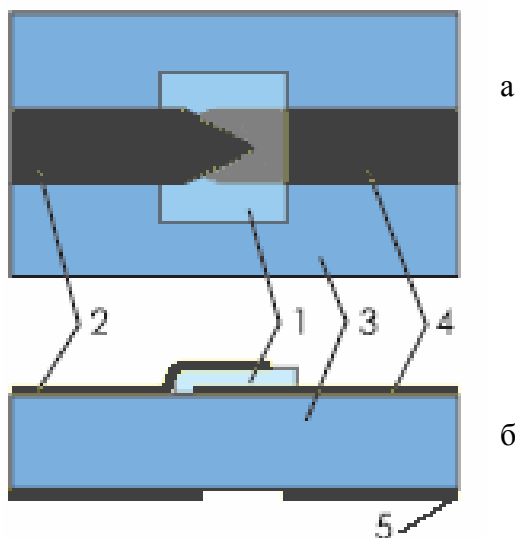


Рис. 2. Резонатор на основе HBAR. а — вид "в плане", б — вид "в профиль", 1 — пленка пьезоэлектрика, 2 — входная микрополосковая линия (МПЛ), 3 — подложка, 4 — выходная МПЛ, 5 — экран

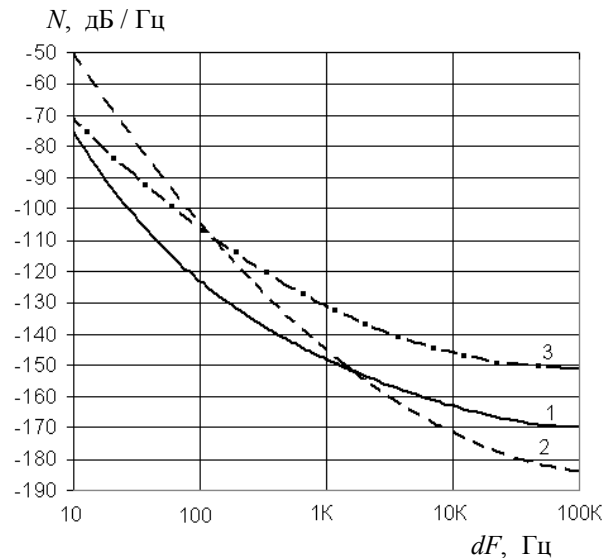


Рис. 3. Сравнительная характеристика генераторов. 1 — HBAR, 2 — ПАВ-резонатор, 3 — кварцевый резонатор с умножителем, N — относительный уровень фазовых шумов, dF — отстройка от основной частоты

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРА НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Дополнительным достоинством НВАР является низкая чувствительность к воздействиям вибрации, что обусловлено конструктивной жесткостью резонатора, выполняемого в виде цилиндра, имеющего диаметр от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров и длину от десятых долей миллиметра до сантиметра.

Однако недостатком НВАР является низкая температурная стабильность резонансной частоты. Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) НВАР на кристалле сапфира составляет примерно $3 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. Тогда при изменении температуры среды на 100°C относительное изменение резонансной частоты составит $3 \cdot 10^{-3}$, в то время как у типичного кварцевого резонатора АТ-среза при тех же условиях оно составляет примерно $2 \cdot 10^{-5}$.

Так, при конструировании генератора на резонансную частоту 1 ГГц с точностью установки частоты 0.1 Гц погрешность установки температуры не должна превышать $3.3 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}$. Известно, что современные компактные датчики температуры позволяют производить измерения с точностью ΔT до $4 \cdot 10^{-2} ^\circ\text{C}$ на $80 ^\circ\text{C}$ [11]. Это соответствует погрешности установки частоты 1200 Гц.

Видно, что прямое измерение температуры позволяет контролировать температуру с точностью, на 4 порядка меньшей необходимой. Поэтому для уменьшения погрешности установки частоты требуются альтернативные способы контроля. Выхо-

дом из данной ситуации может служить применение цифровой частотной автоподстройки частоты (ЦЧАПЧ), принципиальная схема которой представлена на рис. 4. Построение данной системы стало возможным благодаря интенсивному развитию цифровой электроники в последнее время. Преимущество данной системы перед системами фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) заключается в том, что она не вносит шумов, присущих ФАПЧ с широкой полосой захвата частоты [12]. От общепринятого устройства частотной автоподстройки частоты, построенного на частотном дискриминаторе [13], предлагаемая система ЦЧАПЧ отличается тем, что за счет использования высокоточного генератора для синхронизации обеспечивает более точное определение отклонения частоты.

Источник тактовых импульсов ИТИ является высокоточным генератором. На каждый его такт информация из счетчика импульсов Сч подается на вычитатель В, после чего значение счетчика сбрасывается в ноль. Вычитатель сравнивает значение счетчика с ожидаемым значением N и выдает значение ошибки опорного генератора. Счетчик импульсов постоянно считает импульсы опорного генератора, частота которого перед подачей на счетчик делится в 5 раз на делителе Д. Это сделано для обеспечения возможности использования простых, не высокочастотных счетчиков. Так как данная схема обладает свойством накапливать ошибку, единичное значение на выходе вычитателя должно обрабатываться как отклонение частоты от номинала на требуемую точность, т. е. в нашем случае на 0.1 Гц.

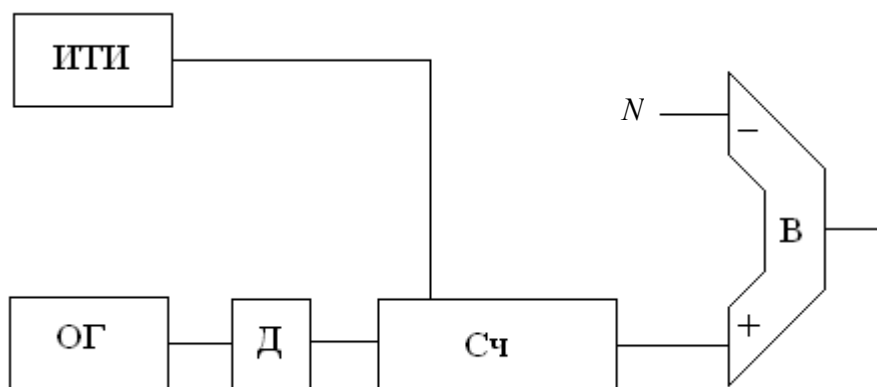


Рис. 4. Принципиальная схема цифровой частотной автоподстройки частоты. ОГ — опорный генератор на основе НВАР, Д — делитель частоты ОГ, Сч — счетчик импульсов, ИТИ — источник тактовых импульсов, N — ожидаемое значение, В — вычитатель

К данной ЦЧАПЧ предъявляются следующие требования. Период сигнала ИТИ должен быть выбран таким образом, чтобы значение N находилось приблизительно в середине диапазона счетчика для обеспечения симметричности обнаружения отклонения частоты. Также разрядность счетчика и период сигнала ИТИ выбираются таким образом, чтобы при максимальных отклонениях частоты (в данном случае $1200 : 5 = 240$ Гц) не происходило переполнение счетчика. Следует отметить, что переполнение счетчика как таковое в данной схеме вполне допустимо и анализу будет подвергнут остаток в счетчике, полученный после определенного числа переполнений. Однако число таких переполнений должно быть строго определено и заранее известно, а другое число переполнений за какой-либо период сигнала ИТИ приведет к ложным данным об отклонении частоты.

Кроме того, для обеспечения регистрации актуальных значений отклонения частоты ОГ период сигнала ИТИ должен в несколько раз превышать время установления $\Delta\tau$ температуры НВАР при компенсации отклонения температуры резонатора на величину ΔT .

С другой стороны, очевидным требованием является уменьшение периода сигнала ИТИ, т. к. это позволит увеличить быстродействие системы стабилизации частоты. Таким образом, величина $\Delta\tau$ является фактором, ограничивающим быстродействие системы ЦЧАПЧ. Поэтому создание системы термостабилизации для НВАР с высоким быстродействием является ключевой проблемой построения малошумящего высокочастотного опорного генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены вопросы построения малошумящего опорного генератора для высокочувствительных РЛС на основе различных типов резонаторов: кварцевых, на основе ПАВ и НВАР. На основе сравнительного анализа показана перспективность применения резонаторов на основе объемных акустических волн. Данный тип резонаторов обеспечивает низкий уровень шумов в широкой полосе отстройки от несущей частоты. Выявлены проблемы построения генераторов на основе НВАР, связанные с высоким ТКЧ резонатора. Приведенные оценки показывают, что для обеспечения требуемой точности установки частоты необходимы разработка и применение быстродействующей системы термостабилизации на основе ЦЧАПЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Царапкин Д.П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2004. 40 с.
2. URL: (www.agilent.com).
3. Дмитриев В.В., Акпамбетов В.Б. и др. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.
4. Плоский А.Ф. Пьезокварц в технике связи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. 50 с.
5. Добровольский А. Высокочастотные прецизионные малошумящие кварцевые генераторы (современные промышленные типы — их построение и основные характеристики) // Chip News. 2003. № 10.
6. URL: (www.cqham.ru).
7. Новоселов В. Резонаторы на поверхностных акустических волнах для радиосистем малого радиуса действия // Chip News. 2003. № 1.
8. Голубский А.А., Казанцева Н.Г. ПАВ-резонаторы с отражательными решетками в виде канавок // Материалы Международной научно-практической конференции "ПЬЕЗОТЕХНИКА-2003", 26–29 ноября 2003.
9. Галдецкий А., Калиникоз Б., Королев А. и др. Монолитные генераторы СВЧ-диапазона с частотоподающими элементами на основе акустических волн // Электроника НТБ. 2005. № 4. С. 34–36.
10. Driscoll M.M. et al. Extremely low phase noise UHF oscillators utilizing high-overtone, bulk-acoustic resonators // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Frec. Contr. November 1992. V. 39, N 6. P. 774–779.
11. URL: (www.murata.com).
12. Стариков О. Метод ФАПЧ и принципы синтеза высокочастотных сигналов // Chip News. 2001. № 6.
13. Вагин Ю.В., Ляшенко А.Г. Частотный дискриминатор радиоприемных устройств. М.: Связь, 1971. 48 с.

*Институт проблем точной механики и управления
РАН, г. Саратов*

Контакты: Якунин Александр Николаевич,
anyakunin@mail.ru

Материал поступил в редакцию 5.08.2011.

PROBLEMS OF LOW-NOISE HIGH-FREQUENCY REFERENCE OSCILLATOR CONSTRUCTION

A. P. Zagorodnov, A. N. Yakunin

Precise Mechanics and Control Institute, RAS, Saratov

The problems of a low-noise reference oscillator construction for high-sensitive radars based on quartz, SAW and HBAR are considered. The comparative analysis shows a promising application of resonators based on bulk acoustic waves. Problems of constructing generators based on HBAR, associated with high TCF resonator were revealed. The method for HBAR temperature stabilization on the basis of digital frequency lock loop is suggested.

Keywords: radiolocation, resonator, SAW, HBAR, lock loop