

Ю.В.Романов (5 курс, каф. КЭ), В.И.Хуторщиков, д.т.н., проф. РИРВ

КОМПЕНСАЦИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ЧАСТОТЫ ПРОГРАММНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ ЦИФРОВОГО КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА РУБИДИЕВОЙ ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

ABSTRACT: Methods to improve long-term stability of quantum frequency standard on a gaseous Rb sample are discussed. The main idea is to use a special digital microcontroller based device and a special program to compensate frequency fluctuations.

В докладе рассматриваются проблемы улучшения долговременной стабильности квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ РГЯ) и методы их решения. В качестве основной идеи рассматривается применение в КСЧ цифрового блока (на базе микроконтроллера) и программное решение задачи компенсации флуктуаций ЦКСЧ.

С развитием радиотехники проблема измерения частоты стала особенно актуальной. С начала XX века для этой цели используются кварцевые генераторы; с созданием квантовой механики стала ясна принципиальная возможность использования атомных резонансов в качестве эталонов частоты. Эту идею впервые высказал американский физик Раби в 1945 г. Для ее реализации используют ансамбль атомов в неравновесном состоянии, частота перехода которых сравнивается с частотой внешнего генератора.

Первые квантовые стандарты частоты на газовой ячейке (КСЧ-ГЯ) были созданы в 1960-1962 гг. в США. Практически одновременно квантовые стандарты частоты сначала на цезиевой газовой ячейке (1962), а затем и на рубидиевой (КСЧ-РГЯ, 1964) были созданы и в СССР (ЛНИРТИ).

В 1985 году было предложено модернизировать существующую схему КСЧ, введя цифровую обработку информации. Спустя 10 лет, в 1997 году, работы по созданию цифрового КСЧ были продолжены в РИРВ. Макет и рабочая установка цифрового КСЧ РГЯ на новой элементной базе блестяще подтвердили предположения относительно упрощения управлением КСЧ, снятия с него данных и повышении его долговременной стабильности за счет применения цифровой обработки информации. В настоящее время идет активное исследование цифрового КСЧ РГЯ с целью выявления оптимальных путей повышения его характеристик. Современные ЦКСЧ РГЯ обеспечивает максимальную точность установки частоты порядка $7 \cdot 10^{-13}$, но вследствие влияния различных факторов реальная точность может уменьшаться.

КСЧ РГЯ характеризуются кратковременной и долговременной нестабильностью. Долговременная нестабильность, наблюдаемая за времена более 10^3 - 10^5 сек., в зависимости от качества основных рабочих элементов КСЧ (элементов квантового дискриминатора - газовой ячейки, спектральной лампы, ячейки-фильтра), обусловлена медленным дрейфом и флуктуациями частоты газовой ячейки.

Постепенное снижение интенсивности света, связанное с миграцией металла в спектральной лампе и ячейке-фильтре, вследствие эффекта световых сдвигов преобразуется в дрейф частоты газовой ячейки и складывается с собственным дрейфом частоты газовой ячейки. Последний также обусловлен миграцией металла, правда, уже в газовой ячейке, ее приработкой, а также постепенным изменением состава газа в ячейке.

Изменение интенсивности света и сдвиг частоты собственно ячейки имеют тенденцию постепенно снижаться вследствие приработки спектральных приборов, что происходит в каждом из них с разной скоростью из-за различия их температур и различия протекающих при этом физических процессов. На этот дрейф накладываются флуктуации частоты, обусловленные флуктуациями внешних параметров - внешней температуры,

давления атмосферы, влажности и т.д. Они усложняют наблюдаемые зависимости, привнося в них элемент случайности.

При больших временах измерения наблюдается сначала постоянное значение частоты (фликкер-шум), а затем возрастание, пропорциональное времени измерения $\tau^{1/2}$, то есть случайное блуждание.

Разработки в направлении улучшения физических и химических свойств элементов КД, обуславливающих долговременную стабильность и срок службы КСЧ, активно ведутся и в настоящее время.

С появлением цифровых элементов в составе КСЧ и благодаря развитию цифровой электроники, появилась возможность анализа данных, полученных путем сравнения результатов работы опытного и эталонного КСЧ, и последующей программной компенсации флуктуаций.

Применение в пассивных КСЧ цифрового программируемого микроконтроллера для выработки сигнала подстройки частоты кварцевого генератора открывает принципиально новые возможности по компенсации флуктуаций. Краткое описание одного из методов приводится ниже.

Зависимость ухода частоты квантового дискриминатора от времени уникальна для каждого образца дискриминатора, поскольку учитывает все передаточные функции, которые могут сильно и слабо коррелировать между собой или не коррелировать вообще. Опыт показывает, что низкочастотная составляющая этой зависимости является достаточно гладкой функцией. Данный факт приводит к идее спрогнозировать поведение функции и производить компенсацию ухода частоты с учетом этого прогноза.

Основной замысел заключается в следующем:

1. На протяжении некоторого времени перед введением КСЧ в эксплуатацию снимать зависимость ухода частоты от времени (сравнивая данные испытуемого КСЧ с эталоном).
2. Произвести интерполяцию снятой зависимости полиномом (соотв. и вычисление коэффициентов полинома).
3. Ввести коэффициенты в ПЗУ микроконтроллера ЦКСЧ РГЯ.
4. В процессе эксплуатации КСЧ экстраполировать значение ухода и вносить поправку в блок микроконтроллера.
5. Через некоторые промежутки времени производить коррекцию коэффициентов полинома (либо в лабораторных условиях, путем сравнения с эталоном на протяжении короткого отрезка времени, либо по каналу связи).

Ввод такой поправки позволит значительно скомпенсировать уход частоты КСЧ вследствие старения. Для реализации данного метода возникает необходимость разработать программное обеспечение как для контроллера, входящего в состав ЦКСЧ, так и для персонального компьютера, используемого для анализа измеренной зависимости и расчета коэффициентов поправочного полинома. Разработка программного обеспечения ведется в настоящее время, предварительные результаты показывают, что компенсация ухода частоты программным методом является перспективным направлением развития КСЧ, ведущим к значительному повышению долговременной стабильности приборов точного времени.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьянц В.В., Жаботинский М.Е., Золин В.Ф. Квантовые стандарты частоты. М.:Наука, 1968.
2. Балыков Ю.Ю. и др. Проблемы совершенствования квантовых стандартов частоты на газовой ячейке.