

# Совершенствование стандарта частоты на атомах цезия, используемых в космических аппаратах дистанционного зондирования Земли

К.Г. Аринушкина  
Санкт-Петербургский  
Политехнический университет  
Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия  
k-arinushkina@mail.ru

А.П. Валов  
Санкт-Петербургский  
государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А.  
Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, Россия  
tony.valov2015@yandex.ru

Е. Исупова  
Санкт-Петербургский  
Политехнический университет  
Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия  
isupova.e24@mail.ru

**Аннотация**—Обоснована необходимость постоянной модернизации квантовых стандартов частоты (КСЧ) – атомных часов, которые используются в спутниковых навигационных и телекоммуникационных системах для решения новых задач по скорости передачи больших объемов информации и т.д. Отмечено, что среди всех атомных часов, цезиевые КСЧ занимают особое место. Эти стандарты являются первичным эталоном частоты, на основе которого основана международная шкала времени. Основной целью всех модернизаций КСЧ является улучшение метрологических характеристик. В случае применения его на подвижных объектах, также важными характеристиками становятся его габариты, вес и энергопотребление. В статье представлен один из вариантов снижения влияния негативных факторов на стабильность работы КСЧ. Рассмотрена задача модернизации цезиевого стандарта частоты посредством включения в него устройства контроля и стабилизации температурного режима его функционирования.

**Ключевые слова**— шкала времени, стабилизация, автоматическая подстройка частоты, стабилизатор частоты, цезиевый стандарт частоты, операционный усилитель, космические аппараты дистанционного зондирования, атомно-лучевая трубка.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы аэрокосмического мониторинга обеспечивают систематическое наблюдение за состоянием окружающей среды и создают основу для выработки управленческих решений в различных областях деятельности. В полете космический аппарат осуществляет прием информации от навигационных спутников «ГЛОНАСС», «GPS», и взаимодействует с наземным комплексом управления и приема, обработки и распространения информации.

Вклад методов точных измерений частоты и времени в развитие мировой науки, технологий и экономики огромен. В качестве примеров можно привести глобальные коммуникационные сети, спутниковые навигационные системы, слаженная работа которых невозможна без стабильных источников известной частоты. Стандарты частоты используются в системах ГЛОНАСС и GPS в качестве синхронизирующих генераторов. В каждой области существуют свои требования к точности нахождения местоположения. Например, при кадастровых работах необходимо, чтобы ошибка была не более 10 сантиметров. Напротив, в дорожной навигации, точности 5 метров зачастую бывает

достаточно [1]. Создание кварцевых и радиоуправляемых часов, корабельной, воздушной и автомобильной спутниковой навигации, высокоскоростных телекоммуникационных линий было бы невозможным без сопутствующего развития технологии создания осцилляторов, стандартов частоты и методов синхронизации. Оборудование, используемое в этих сферах деятельности, имеет различные требования к точности и стабильности частоты задающих генераторов. Выполнение этих требований в спутниковых системах навигации имеет ряд дополнительных трудностей, связанных как с особенностями среды функционирования, так и с автономностью самого объекта [2].

Стандарты частоты являются одними из основных устройств, обеспечивающих формирование и воспроизведение единиц измерения времени и частоты – секунда и герц (Гц).

На XIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято, что секунда – время, равное 9 192 631 770 периодам электромагнитного излучения, возникающего при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при температуре 0 К.

Одним из главных факторов, влияющих на точность геолокации, являются системные погрешности, вносимые аппаратурой космического комплекса. Погрешности, связанные с функционированием бортовой аппаратуры спутника и наземного комплекса управления ГНСС обусловлены в основном несовершенством частотно-временного и эфемеридного обеспечения [3].

## 2. СИСТЕМА АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Погрешность измерения задержек между синхросигналами космических аппаратов (КА) в точке приёма, от которой зависит и точность вычисления координат объекта, определяется погрешностью формирования шкал времени и стабильностью частот опорных генераторов (ОГ). Анализ требований к точностным характеристикам бортового синхронизирующего устройства показывает, что их выполнение возможно только при использовании в качестве опорных генераторов квантовых стандартов частоты, работающих в непрерывном режиме в течение всего срока эксплуатации КА.

Наивысшая стабильность частоты достигается в квантовых стандартах частоты, которые работают на основе явления избирательного (резонансного) поглощения и излучения энергии электромагнитного поля квантовыми системами (атомами, молекулами, ионами). В зависимости от используемых квантовых объектов КСЧ именуется атомными или молекулярными [4]. Наряду с КСЧ находят применение и кварцевые стандарты, частота колебаний которых определяется собственной частотой кварцевого резонатора. Стандарт частоты на атомах цезия  $Cs^{133}$  является основным стандартом частоты, поскольку государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени работает на основе высокочастотного энергетического перехода в атоме  $Cs^{133}$  [5].

Для улучшения характеристик стандарта частоты необходимо уменьшить влияние ряда дестабилизирующих факторов, прежде всего, уменьшить нестабильность магнитного поля в области взаимодействия атомов и электромагнитного поля (долговременный дрейф источника тока, его температурная зависимость, влияние внешнего магнитного поля). Эта задача может решаться не только при создании новых типов стандартов частоты, но и при модернизации существующих. При этом, одновременно может быть достигнуто уменьшение веса и габаритов, снижение энергопотребления, улучшение их метрологических характеристик.

От температуры окружающей среды зависит напряжение, подаваемое на устройство управления в схеме автоматической подстройки частоты (рисунок 1), и, следовательно, напряжение, подаваемое на кварцевый генератор. Температура окружающей среды непосредственно влияет на сопротивление терморезистора и выходной сигнал операционного усилителя (ОУ). Зависимость приведена на рисунке 2.

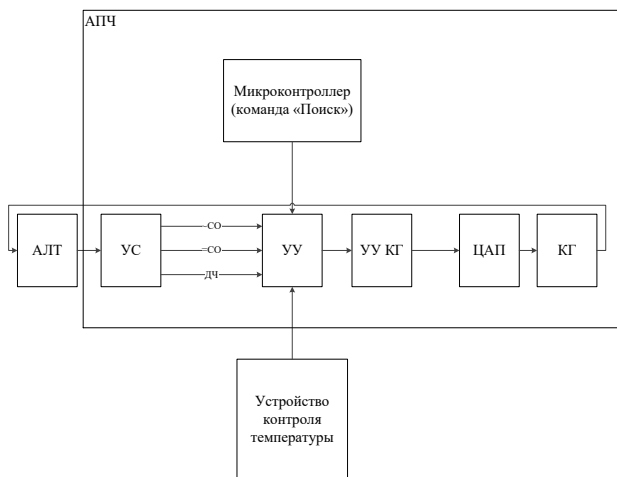


Рис. 1. Схема АПЧ квантового стандарта частоты: АЛТ- атомно-лучевая трубка, УС – согласующий усилитель, УУ – устройство управления, КГ – кварцевый генератор, СО- сигнал ошибки

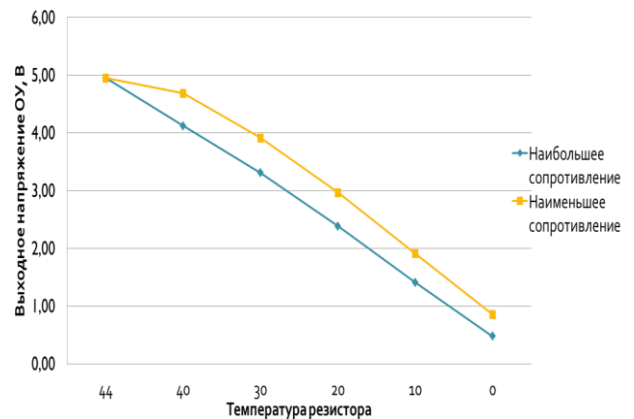


Рис. 2. Зависимость напряжения от температуры для резисторов разного номинала

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали эффективность использования систем автоподстройки частоты с устройством термокомпенсации. В результате разработки устройства компенсации температурного коэффициента частоты уменьшилась его температурная чувствительность в 3 раза, что улучшило синхронизацию временных шкал спутников навигационной системы. Погрешность согласования временных шкал спутников составила 10 наносекунд, что может сократить погрешность геолокации до 1,3 м.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Allan, D.W. Statistics of atomic frequency standards / D.W. Allan // Proc. IEEE. – 1966. – Vol. 54(2) – P. 221.
- [2] ГОСТ.8.567-99 Государственная система обеспечения единства измерений // Измерения времени и частоты. Термины и определения.
- [3] Павлов, Б.А. Возбудители радиопередающих устройств: учеб. пособие / Б.А. Павлов, В.Н. Филатов. – СПб: СПбГУАП, 2003. – 24 с.
- [4] Риле, Ф. Стандарты частоты: принципы и приложения / Ф. Риле. – М.: Физматлит, 2009. – 511 с.
- [5] Ингеберман, М.И. Термостатирование в технике связи / М.И. Ингеберман, Э.М. Фромберг, Л. П. Грабой. – Москва: Связь, 1979. – 144 с.