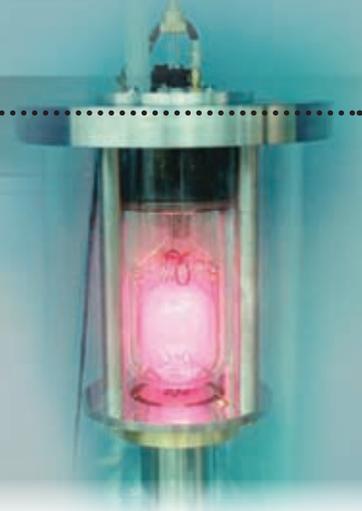


ВОДОРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕНИ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ



В 2010 году исполнится полвека с момента создания в лаборатории Н.Ф.Рэмси в Гарварде (США) первого мазера на атомах водорода. Он возник в ходе работ по получению максимальной точности при проведении экспериментов с атомными пучками и до сих пор остается прибором с высокой кратковременной и долговременной стабильностью частоты выходного сигнала. В СССР первые работы по созданию водородного мазера начались в 1961 году, и с 70-х годов прошлого столетия их стали широко применять в стране. Водородные мазеры и стандарты частоты на их основе используются для решения целого круга научных и высокотехнологичных задач. Они активно применяются в радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и для хранения времени. А в 1990-е годы ведущие центры многих стран мира, занимающиеся хранением времени, стали включать их в состав ансамбля атомных часов. Так, в обсерватории ВМС США (The United States Naval Observatory, USNO) в ансамбле атомных часов используется более 20 водородных мазеров. Сегодня водородные мазеры нашли применение в системах глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и Galileo). Полеты к Марсу и в ближний космос также не смогут обойтись без них. В мире уже выпущено немногим менее тысячи водородных мазеров разных модификаций. Половина из них произведена в России во ФГУП НИИПИ "Кварц".

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКТИВНОГО ВОДОРОДНОГО МАЗЕРА

Водородный мазер обладает высокой кратковременной и долговременной стабильностью частоты. Определяющим является длительное время взаимодействия атомов с электромагнитным полем. В водородном мазере для увеличения времени взаимодействия используется специальная накопитель-

Н.Демидов, д.т.н., В.Васильев

ная колба, покрытая инертным материалом, например фторопластом. Время нахождения атома в колбе T_b выбирается близким к 1 с. В этом случае добротность спектральной линии водорода получается очень высокой: $Q_a = \nu_0 / \Delta\nu_0 \approx 2 \cdot 10^9$.

Следует отметить, что у атома водорода структура используемых уровней максимально проста. В первом приближении квантовая система обычно рассматривается как двухуровневая, но в действительности наличие соседних уровней — причина появления дополнительных сдвигов частоты, а также ухудшения стабильности мазера. В водородном мазере используется переход $F=1, m_F=0 \rightarrow F=0, m_F=0$ между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода (рис.1), которая возникает в результате взаимодействия спина электрона и спина ядра. В постоянном магнитном поле в силу эффекта Зеемана происходит расщепление сверхтонкой структуры.

Молекулярный водород хранится в баллончике в связанном виде (рис.2). Очиститель удаляет в нем посторонние примеси. Принцип работы очистителя основан на способности водорода диффундировать через металлические мембраны в больших количествах, чем другие газы. В качестве материала мембраны очистителя наибольшее распространение получили палладий и никель. Пройдя через очиститель, молекулы водорода попадают в разрядную колбу, в которой поджигается высокочастотный безэлектродный разряд, приводящий к диссоциации молекул. Атомы водорода, полученные в ВЧ-разряде, формируются в пучок многоканальным коллиматором. После прохождения через магнитную сортирующую систему в пучке остаются только атомы в состояниях $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=+1$. Для селекции атомов по состояниям используют неоднородное магнитное поле шести- или четырехполюсного магнита.

После прохождения сортирующего магнита атомы попадают в накопительную колбу объемом 2–4 л, расположенную в центре цилиндрического СВЧ-резонатора. Используется TE011 мода колебаний, так как она обладает наименьшими потерями и создает достаточно однородную магнитную компоненту СВЧ-поля на оси. Добротность ненагружен-

ного резонатора может достигать $Q_c \approx 80000$. Снаружи резонатора находится соленоид, создающий вдоль оси однородное статическое магнитное поле $\sim 10^{-7}$ Т. Многослойный магнитный экран, изготовленный из материала с высокой магнитной проницаемостью ($\mu_0 > 100000$), защищает область резонатора от изменений окружающего магнитного поля более чем в 10^5 раз.

Работа водородного лазера возможна только в условиях сверхвысокого вакуума $\sim 10^{-6}$ Па в области накопительной колбы и $\sim 10^{-4}$ Па в области резонатора.

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ АКТИВНОГО ВОДОРОДНОГО МАЗЕРА

Кратковременная стабильность частоты активного водородного лазера определяется известным выражением:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{Q_a \sqrt{\tau}} \sqrt{\frac{kT}{2P_a}}, \quad (1)$$

где P_a – мощность, рассеиваемая в генераторе, k – постоянная Больцмана, τ – время измерения. Это выражение описывает нестабильность частоты лазера при времени измерения

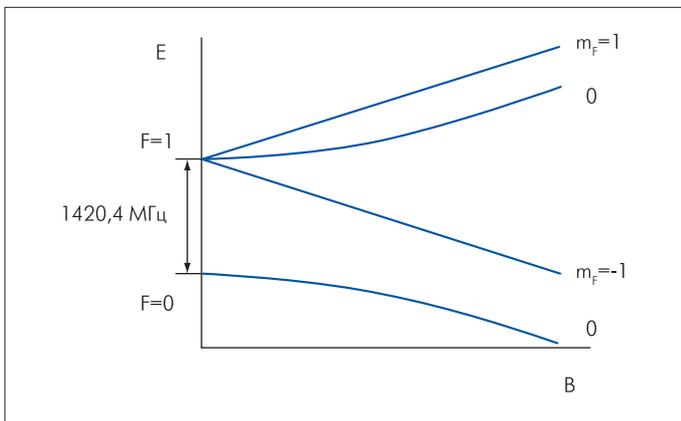


Рис. 1. Энергия сверхтонких подуровней атома водорода как функция внешнего магнитного поля.

$\tau > 10$ с. При малых значениях времени измерения $0,1 < \tau < 10$ с стабильность частоты ухудшается из-за влияния шумов электронных цепей стандарта:

$$\sigma(\tau) = \frac{\beta kT}{v_0^2 P_a \tau} \left(1 + F \frac{P_a}{P_r} \right),$$

где β – константа, F – коэффициент шума усилителя, P_r – эффективная мощность, принимаемая усилителем. Как следует из (1), для достижения лучшей стабильности необходимо минимизировать отношение $1/(Q_a \sqrt{P_a})$, т.е. максимально увеличить Q_a и P_a .

Основная причина, ограничивающая мощность генерации и добротность атомной линии, – спин-обменные столкновения атомов в накопительной колбе. Мощность генерации имеет сложную зависимость от интенсивности

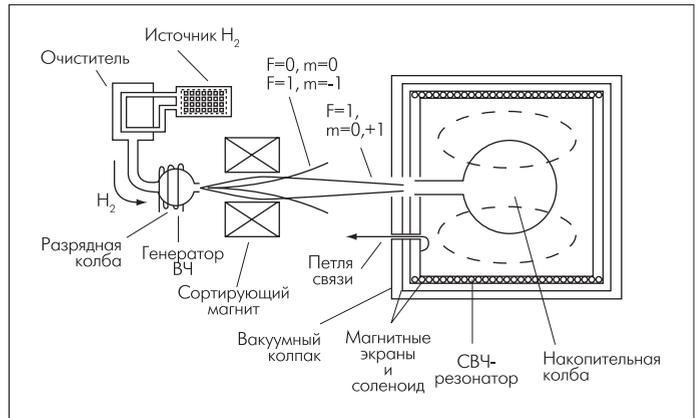


Рис. 2. Общая схема водородного лазера

пучка I при разных значениях добротности резонатора Q_c (рис.3) и других параметрах лазера. Из рис.3 следует, что условия генерации могут выполняться лишь при высокой добротности резонатора. При $Q_c \approx (35-45) \cdot 10^3$ мощность генерации лазера и добротность спектральной линии составляют $P_a \approx 4 \cdot 10^{-13}$ Вт и $Q_a \approx 1,5 \cdot 10^9$. В соответствии с выражением (1) при указанных параметрах стабильность лазера составляет $\sigma_1 \approx 5 \times 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$ для $\tau > 10$ с. При меньших значениях времени измерения определяющим являются шумы электронных устройств, и стабильность лазера за 1 с равна $1,5 \cdot 10^{-13}$.

Долговременная стабильность частоты водородного лазера, согласно формуле (1), с увеличением времени измерения должна улучшаться пропорционально $\tau^{-1/2}$. Но это наблюдается лишь в течение какого-то времени, после чего начинают проявляться возмущающие физические факторы (табл.1). Эти факторы достаточно хорошо изучены, и улучшение долговременной стабильности частоты водородного лазера связано с проблемой их стабилизации.

Действие возмущающих эффектов, перечисленных в табл.1, проявляется в разной степени. Хотя эффект Доплера второго порядка вызывает наибольший сдвиг частоты, он хорошо контролируется. Сдвиг из-за спин-обменных столкновений атомов пропорционален концентрации атомов в кол-

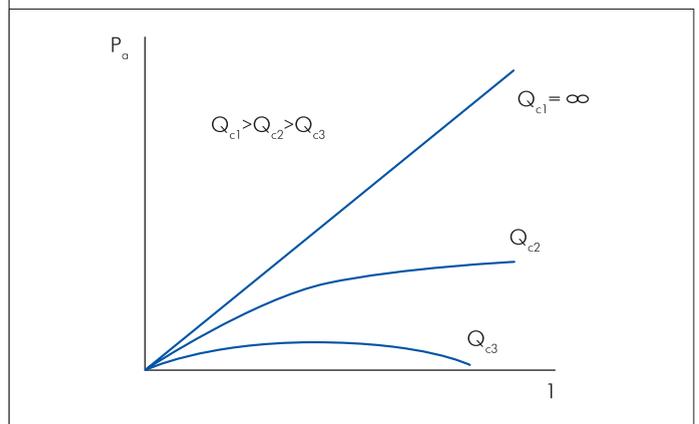


Рис. 3. Зависимость мощности генерации лазера от интенсивности пучка атомов водорода

Таблица 1. Наиболее значительные возмущающие факторы, влияющие на долговременную стабильность частоты

Возмущающий фактор	Уравнение	Относительное значение	Возможная нестабильность
Эффект Доплера второго порядка	$\frac{\Delta v_D}{v} = \frac{-3kT}{2mc^2}$	$-4,31 \cdot 10^{-11}$	$\sim 10^{-16}$
Спин-обменные столкновения атомов	$\frac{\Delta v_D}{v} = \alpha n_a$	$2 \cdot 10^{-13}$	$\sim 10^{-15} \dots 10^{-16}$
Магнитное поле	$\frac{\Delta v_M}{v} = \frac{2,773 \times 10^{11} \times B_0^2}{v_0}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$\sim 10^{-15} \dots 10^{-16}$
Столкновение со стенками накопительной колбы	$\frac{\Delta v_W}{v} = \frac{K}{D}$	$-1 \cdot 10^{-11}$	$\sim 10^{-15} \dots 10^{-17}$ / сутки
Расстройка резонатора	$\frac{\Delta v_C}{v} = \frac{Q_C}{Q_a} \times \frac{(v_C - v_0)}{v_0}$	-0	$\sim 10^{-14} \dots 10^{-16}$

бе n_a и обычно не вызывает проблем, связанных со стабилизацией частоты. Сдвиг из-за столкновения атомов со стенками накопительной колбы может изменяться во времени, что приводит к систематическому изменению частоты стандарта. У недавно изготовленных мазеров дрейф частоты, обусловленный этим механизмом, может достигать $3 \cdot 10^{-15}$ в сутки. Дрейф частоты мазеров, проработавших более трех лет, может составлять менее $1 \cdot 10^{-16}$ в сутки.

СВЧ-резонатор и излучающие атомы образуют пару связанных осцилляторов. Сдвиг частоты в одном из них будет затягивать частоту другого пропорционально отношению их добротностей. Если ставится задача достижения стабильности частоты мазера $3 \cdot 10^{-16}$ в сутки, то стабильность частоты резонатора при типичных значениях $Q_a \approx 1,6 \cdot 10^9$ и $Q_C \approx 4 \cdot 10^4$ должна быть порядка $1 \cdot 10^{-11}$ в сутки. В этом случае линейные размеры резонатора должны быть стабильны в пределах $3 \cdot 10^{-3}$ нм, а это меньше размеров атома водорода. К тому же механизм старения материала резонатора приводит к дрейфу частоты мазера $\sim 10^{-14}$ в сутки. Этот дрейф может быть устранен системой электронной автоматической настройки частоты резонатора (АНР).

Еще одна причина ухудшения долговременной стабильности связана с температурным коэффициентом частоты (ТКЧ) мазера. Для устранения этой проблемы резонаторы выполняют из материалов с очень малым ТКЧ, таких как плавленый кварц или ситалл. Например, у стандарта частоты Ч1-75А ФГУП НИИПИ "Кварц" с ситалловым резонатором ТКЧ $\approx 1 \cdot 10^{-15}/^\circ\text{C}$. Из кривых вариации Алана для Ч1-75А с автономной системой АНР, полученных в ФГУП НИИПИ "Кварц" и в парижской обсерватории, видно, что в первом случае имеется горизонтальный участок графика за период $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$ с (рис.4а). Наличие такого участка – следствие температурной флуктуации помещения, тогда как у того же стандарта кривые, полученные парижской обсерваторией, в которой точность поддержания температуры выше (около $\pm 0,3^\circ\text{C}$), подобный участок отсутствует (рис.4б)

МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ СВЧ-РЕЗОНАТОРА

На сегодняшний день известны три метода автоматической настройки частоты резонатора активных водородных мазеров. Первый метод связан с модуляцией добротности линии Q_a в лазере. Это можно осуществлять либо путем изменения интенсивности атомного пучка, либо созданием в резонаторе неоднородного магнитного поля. Если резонатор не настроен, то при изменении $Q_{a1} \rightarrow Q_{a2}$ частота выходного сигнала мазера будет изменяться. При этом знак изменения частоты будет зависеть от частоты резонатора v_C . Точность настройки зависит от параметра $R = (Q_{a1}/Q_{a2}) - 1$ и ограничена падением мощности генерации. К достоинствам этого способа можно отнести то, что мазер нечувствителен к случайным вариациям атомного пучка и, кроме того, независимость частоты настройки резонатора от электронных узлов мазера. Оба способа применены в лазере Ч1-75. При этом стабильность частоты составляет $\sim 2 \cdot 10^{-15}$ за сутки. Большая постоянная времени метода ~ 1 сутки не позволяет получить лучшую стабильность. Основной недостаток метода – необходимость применения второго (опорного) стандарта, относительно которого отсчитывается изменение частоты.

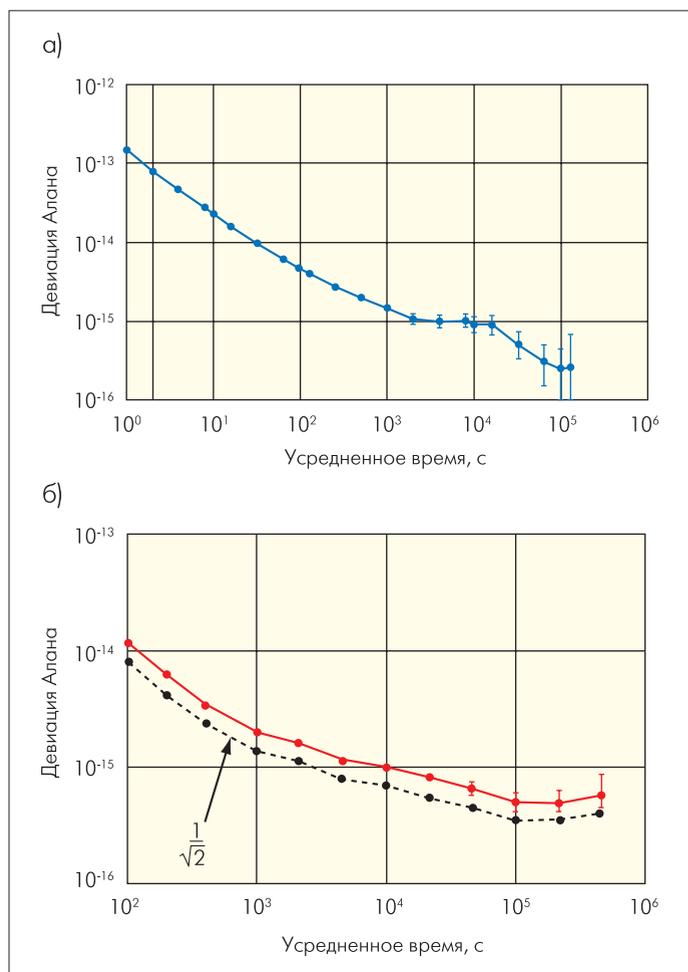


Рис.4. Стабильность водородного стандарта частоты Ч1-75А в нетермостатированной комнате (а) и в парижской обсерватории (б)



Второй метод АНР основан на коммутации частоты СВЧ-резонатора между двумя частотами, примерно равноудаленными от частоты спектральной линии ν_0 . Период коммутации выбирается так, чтобы он был больше времени затухания поля в резонаторе и меньше времени релаксации атомов. Это приводит к модуляции амплитуды сигнала лазера. Частота настройки резонатора соответствует минимуму амплитудной модуляции. Метод обеспечивает удовлетворительное отношение сигнал/шум и, что немаловажно, является автономным. Постоянная времени этого метода составляет ~1–2 ч. Этот метод реализован в водородном стандарте частоты МНМ-2010 фирмы Symmetricom, США, а также в стандартах Ч1-75А и Ч1-90 ФГУП НИИПИ "Кварц".

В основе третьего метода АНР лежит введение дополнительного сигнала в резонатор. Этот метод также автономен и считается многообещающим, так как не связан напрямую с сигналом генерации лазера. Главное достоинство метода – применение дополнительного сигнала большой амплитуды, что позволяет получать хорошее отношение сигнал/шум и малую постоянную времени управления резонатором. Но ввод сигнала в резонатор сопряжен с возмущениями спектральной линии. Необходимо следить за спектральной чистотой сигнала и за отсутствием несущей частоты. Метод применен в водородных стандартах частоты Шанхайской обсерватории. Характеристики активных водородных лазеров приведены в табл.2.

ПАССИВНЫЙ ВОДОРОДНЫЙ МАЗЕР

Большие размеры активного водородного лазера – одна из причин его ограниченного применения. Стремление миниатюризировать прибор привело к появлению пассивного водородного стандарта частоты (ПВСЧ). С уменьшением размеров резонатора ухудшается его добротность, и лазер не достигает порога генерации. Но при подаче внешнего сигнала лазер ведет себя как усилитель с селективными свойствами

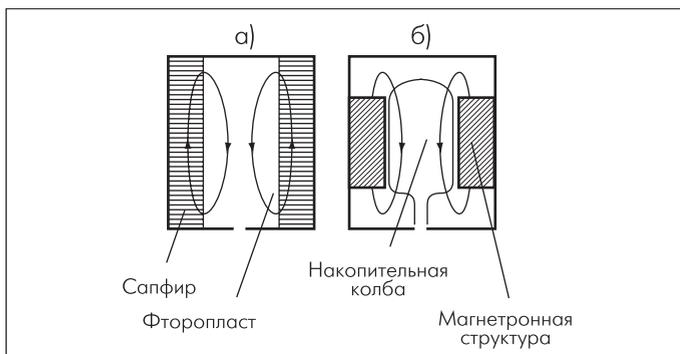


Рис.5. Способы уменьшения размера резонатора путем заполнения его диэлектриком (а) и с помощью специальной структуры (б)

по частоте. Модуль коэффициента усиления для случая слабого сигнала можно представить как

$$|G(\nu)| = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha-2)}{1 + T_2^2(\nu - \nu_0)^2} \right]^{-1/2},$$

где α – параметр возбуждения (при начале генерации $\alpha=1$), T_2 – поперечное время релаксации.

Стабильность частоты определяется выражением

$$\sigma(\tau) = \frac{A}{Q_a \sqrt{\tau}} \sqrt{\frac{kT}{Q_c}},$$

где A – константа для данной конструкции лазера.

Размеры резонатора можно уменьшить двумя способами. Первый предусматривает заполнение резонатора монокристаллом сапфира или Al_2O_3 -керамикой. На предусмотренную в диэлектрике полость наносят фторопласт (рис.5а). В этом случае используемый материал определяет размеры резонатора. Второй способ заключается в размещении в резонаторе специальной структуры из аксиально-симметричных металлических пластин (рис.5б). Варьируя размеры емкостных зазоров между пластинами, можно изменять размеры резонатора. Резонатор выглядит как магнетронная структура. Такое техническое решение обеспечивает приемлемое значе-

Таблица 2. Характеристики промышленно выпускаемых активных водородных лазеров

Характеристика	Ч1-75А, ФГУП НИИПИ "Кварц"	Ч1-90, ФГУП НИИПИ "Кварц"	МНМ-2010, компания Symmetricom	Мазер Шанхайской обсерватории
Стабильность, СКДО*				
1 с	1,5·10 ⁻¹³	1,5·10 ⁻¹³	1,5·10 ⁻¹³	4·10 ⁻¹³
10 с	2,5·10 ⁻¹⁴	2,5·10 ⁻¹⁴	5·10 ⁻¹⁴	5·10 ⁻¹⁴
102 с	7·10 ⁻¹⁵	7·10 ⁻¹⁵	1,3·10 ⁻¹⁴	8·10 ⁻¹⁵
103 с	2·10 ⁻¹⁵	2·10 ⁻¹⁵	3,2·10 ⁻¹⁵	6·10 ⁻¹⁵
104 с	1·10 ⁻¹⁵	8·10 ⁻¹⁶	3·10 ⁻¹⁵	5·10 ⁻¹⁵
1 сутки	7·10 ⁻¹⁶	3·10 ⁻¹⁶	3·10 ⁻¹⁵	–
ТКЧ, 1/°С	1·10 ⁻¹⁵	1·10 ⁻¹⁵	1·10 ⁻¹⁴	3·10 ⁻¹⁴
Магнитная чувствительность, Т	1·10 ⁻¹⁴ /10 ⁻⁴	1·10 ⁻¹⁴ /10 ⁻⁴	3·10 ⁻¹⁴ /10 ⁻⁴	1,4·10 ⁻¹⁴ /10 ⁻⁴
Система настройки резонатора	Автоматическая, автономная	Автоматическая, автономная	Автоматическая, автономная	Автоматическая, автономная
Размеры, м	0,6×0,48×0,71	0,61×0,44×0,72	0,46×0,76×1,09	0,52×0,68×1,08
Способ откачки	Геттерный насос	Геттерный насос	Ионный насос	–
Масса, кг	95	90	200	150

*Среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты.



Рис.6. СВЧ-резонатор магнетронного типа, используемый в водородном стандарте частоты и времени Ч1-76А

ние добротности Q_c , хороший фактор заполнения и жесткость конструкции. На рис.6 изображен резонатор магнетронного типа, разработанный во ФГУП ННИПИ "Кварц".

Стабильность пассивного лазера хуже, чем у активного, но его размеры и масса меньше. К тому же, более жесткая конструкция резонатора ПВСЧ делает его особо привлекательным для космических применений. Характеристики ПВСЧ приведены в табл.3.

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ВОДОРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕНИ

В 2007 году ФГУП ННИПИ "Кварц" закончил разработку водородных стандартов частоты и времени следующего поколения. В активном водородном стандарте нового поколения Ч1-90 использованы хорошо себя зарекомендовавшие технические решения, реализованные в стандарте Ч1-75А с автономной АНР. При этом существенно переработана вся радиотехническая часть прибора. Применение цифровых микросхем, в частности ПЛИС, позволило повысить надежность прибора. Введение в структурную схему встроенного микрокомпьютера существенно улучшило диагностику состояния прибора и расширило возможности дистанционного управления. Уменьшение уровня шумов и помех обеспечило дальнейшее улучшение стабильности частоты. Рис.7, на котором представлен спектр фазовых шумов выходного сигнала на частоте 5 МГц, свидетельствует о низком уровне паразитных составляющих.

Пассивный водородный стандарт нового поколения Ч1-91 претерпел существенные изменения конструкции квантового водородного дискриминатора, что привело к уменьшению габари-

ритов и массы прибора в целом. В электронной системе стандарта также широко использованы цифровые микросхемы, позволяющие уменьшить размеры радиотехнических блоков. Микрокомпьютер осуществляет диагностику, предупреждает о неисправностях и позволяет автоматизировать управление прибором. Улучшены метрологические характеристики стандарта.

По нестабильности частоты новое поколение активных и пассивных водородных стандартов превосходит все остальные промышленно выпускаемые стандарты частоты (рис.8). Они найдут широкое применение в эталонах времени и час-

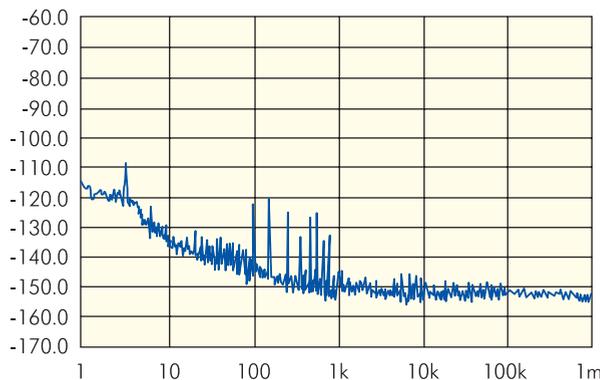


Рис.7. Спектральная плотность мощности фазовых шумов выходного сигнала на частоте 5 МГц стандарта Ч1-90 при отстройке от несущей

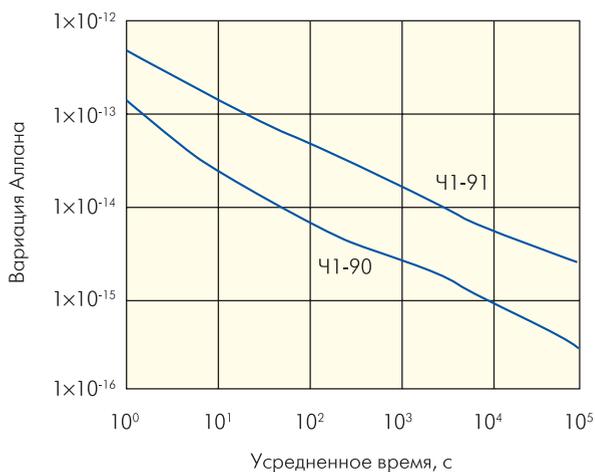


Рис.8. Зависимость нестабильности частоты выходного сигнала от времени измерения для водородных стандартов Ч1-90 и Ч1-91

тоты, а также для синхронизации наземных станций слежения системы ГЛОНАСС. Увеличение срока службы стандартов и уменьшение габаритов Ч1-91 повысят его эксплуатационную привлекательность для потребителей.

Водородные стандарты частоты и времени нашли применение в научных экспериментах, промышленности, метрологии и глобальных спутниковых навигационных системах. Применение новейших технологий радиоэлектроники обеспечивает их миниатюризацию и дальнейшее повышение стабильности частоты. ○

Таблица 3. Характеристики промышленно выпускаемых пассивных водородных лазеров

Характеристика	Ч1-76А ФГУП ННИПИ "Кварц"	Ч1-91 ФГУП ННИПИ "Кварц"	ПВСЧ для системы Galileo	ПВСЧ Шанхайской обсерватории
Стабильность, СКДО				
1 с	1,5·10 ⁻¹²	5·10 ⁻¹³	1·10 ⁻¹²	1·10 ⁻¹¹
10 ² с	5·10 ⁻¹³	5·10 ⁻¹⁴	1·10 ⁻¹³	1·10 ⁻¹²
1 сутки	1·10 ⁻¹⁴	2,5·10 ⁻¹⁵	1·10 ⁻¹⁴	7·10 ⁻¹⁴
Размер, м	0,28×0,48×0,59	0,2×0,44×0,555	0,25×0,21×0,5	0,4×0,52×0,7
Масса, кг	51	30	18	40