

Бортовой водородный стандарт частоты для космической обсерватории «Миллиметрон»

Н. А. ДЕМИДОВ, А. А. БЕЛЯЕВ, В. А. ПОЛЯКОВ, Ю. В. ТИМОФЕЕВ

ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: polyakov@vremya-ch.com

Описаны основные конструктивные особенности водородного стандарта частоты, предназначенного для работы в качестве опорного стандарта частоты в условиях открытого космоса. Рассмотрена возможность применения системы двойной сортировки атомов водорода по энергетическим состояниям для повышения метрологических характеристик водородного стандарта частоты. Приведены экспериментальные результаты по нестабильности частоты.

Ключевые слова: бортовой активный водородный стандарт частоты, система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям, метод адиабатически быстрого прохождения, нестабильность частоты.

The main design features of onboard active hydrogen maser for "Millimetron" space mission are shown. State selection system development is discussed for frequency stability improvement. The frequency stability experimental results are given.

Key words: onboard active hydrogen maser, double selecting system, adiabatic rapid passage, frequency stability

Среди научных проектов, расширяющих границы человеческих знаний о космосе, особое место занимает смонтированный на российском космическом аппарате «Спектр-Р» радиотелескоп «РадиоАстрон». В 2011 г. этот самый крупный в мире радиотелескоп был запущен в Российской Федерации. Снимки, полученные с «РадиоАстрона», в тысячу раз детальнее, чем у космического телескопа Hubble. «РадиоАстрон» предназначен для исследования излучений космического пространства в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Он может работать как в самостоятельном режиме, так и в режиме наземно-космического интерферометра со сверхдлинной (до 360000 км) базой. Успешная работа интерферометра обеспечивается при выполнении условия

$$2\pi f \tau \sigma(\tau) \leq 1,$$

где f – частота принимаемых радиоинтерферометром излучений; $\sigma(\tau)$ – нестабильность частоты опорного, т. е. синхронизирующего работу всей аппаратуры, стандарта частоты за время усреднения τ .

Верхняя граница рабочей частоты интерферометра определяется нестабильностью опорного сигнала. В проекте «РадиоАстрон» в качестве опорного стандарта частоты использован активный водородный стандарт частоты, разработанный в ЗАО «Время-Ч» для работы в условиях космического пространства [1]. Для $\tau=100$ и 1000 с верхние значения рабочих частот составляют менее 230 и 70 ГГц, соответственно. Таким образом, при увеличении времени наблюдений рабочая частота водородного стандарта уменьшается, так как требования к её нестабильности возрастают пропорционально величине τ^{-1} . В свою очередь, нестабильность частоты водородного стандарта частоты на этих временных интервалах снижается соразмерно $\tau^{-1/2}$.

В настоящее время в соответствии с Федеральной кос-

мической программой Российской Федерации в Астрокосмическом центре Физического института им. Лебедева Российской академии наук разрабатывается наземно-космический радиоинтерферометр нового поколения «Миллиметрон». Он будет работать в миллиметровом и инфракрасном диапазонах на длинах волн 0,02–17 мм и частотах, в 2–3 раза превышающих рабочие частоты «РадиоАстрона» (до 900 ГГц). Следовательно, требования к нестабильности частоты этого бортового опорного генератора возрастут до значений $7 \cdot 10^{-14}$ – $5 \cdot 10^{-16}$ за время усреднения $\tau=1 \dots 1000$ с, соответственно. Разработанные в последние годы сверхстабильные источники частоты (криогенные сапфировые генераторы, оптические стандарты частоты с комб-преобразованием в радиочастотный диапазон) по своим конструктивным характеристикам непригодны для доставки на космические объекты и длительной (12 лет и более) работы на них. Из стандартов частоты, приспособленных для работы в космосе, наименьшей нестабильностью частоты на интервалах времени усреднения от одной секунды до суток обладают лишь водородные стандарты частоты. Поэтому в проекте «Миллиметрон» в качестве опорного стандарта утверждён активный бортовой водородный стандарт частоты БВСЧ-М.

Основные требования к конструкции. Основное направление работ в области БВСЧ-М – повышение стабильности частоты до требований, установленных в техническом задании, с одновременным выполнением жёстких требований по вибро- и ударопрочности конструкции в целом и её отдельных узлов в частности. В связи с этим были основательно переработаны конструкция водородного генератора (ВГ) и электронные узлы прибора. Упрощённая схема бортового ВГ представлена на рис. 1. Кроме усиления каркаса и введения дополнительных точек крепления основных узлов было принято решение о замене ситаллового резонатора 2 на титановый резонатор с посеребрёнными стенками. Дно и крышку резонатора в це-

лях увеличения жёсткости конструкции и уменьшения массы выполнили коническими. Характеристики полученного резонатора оказались близки к характеристикам обычного. Так, добротность нагруженного резонатора 2 с колбой 1 соответствует значению 40000, а зависимости частоты и добротности от напряжения на управляющем и модулирующем варикапах аналогичные. Температурный коэффициент линейного расширения титана ($8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) примерно в 40 раз выше, чем у ситалла. Однако применение многослойной цифровой системы термостатирования резонатора позволило достигнуть значения температурного коэффициента частоты на уровне $1 \cdot 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$. В новом бортовом ВГ переделали очиститель 9 молекулярного водорода, а также доработали конструкцию и крепёж магнитоотрядных насосов и магнитных экранов 3. При введении в конструкцию четырёхслойного магнитного экрана коэффициент магнитного экранирования составил $6 \cdot 10^{-13}/(\text{А/м})$. Для хранения водорода, необходимого для 15 лет непрерывной работы устройства, используется гидридный аккумулятор 11 на основе порошка интерметаллида LaNi_5 . Объёмные показатели хранения водорода в LaNi_5 почти вдвое лучше, чем у жидкого водорода. При гидрировании LaNi_5 до состояния $\text{LaNi}_5\text{H}_{6.7}$ плотность водорода в пересчёте на число атомов водорода в единице объёма гидрида превышает этот показатель в жидком водороде в 1,8 раза, а в сжатом до 10^6 Па газообразном водороде – в 15,5 раза. Вакуумные объёмы 5 сверхвысокочастотного резонатора 4 и накопительной колбы отделены друг от друга, водород откачивается геттерным насосом, не потребляющим энергию в процессе эксплуатации.

В электронную часть водородного стандарта частоты тоже внесли существенные изменения. Общие требования по вибро- и ударопрочности были сохранены, но при работе в высоком вакууме из-за конвекции воздуха перестали охлаждаться элементы схемы, поэтому возникла необходимость подбирать и контролировать тепловые режимы в вакуумной камере. Элементная база и материалы, из которых выполнен водородный генератор, должны быть пригодны для надёжного функционирования в полёте при воздействии всех видов космических излучений. Включение и выключение прибора, контроль, установка и изменение параметров производятся с наземного пункта управления. Водородный стандарт частоты может работать в режимах с включённой и выключенной автоматической настройкой частоты резонатора. В конструкции предусмотрена функция резервирования отдельных участков схемы. К стандартным выходным сигналам 10, 100 МГц и 1 Гц добавили выходной сигнал частотой 1 ГГц. В космической обсерватории предполагается установка двух водородных стандартов частоты, поэтому ввели перекрестное резервирование их выходных сигналов. Встроенный частотный компаратор позволяет проводить взаимное сличение частот этих стандартов с передачей результатов измерений на Землю.

В водородном стандарте частоты применён метод автоматической настройки резонатора на частоту атомного перехода, основанный на модуляции частоты резонатора ВГ [2]. Система автоматической настройки выполнена полностью цифровой, что дополнительно повышает её надёжность. Минимальный шаг частоты настройки в выходной частоте ВГ составляет $1 \cdot 10^{-16}$.

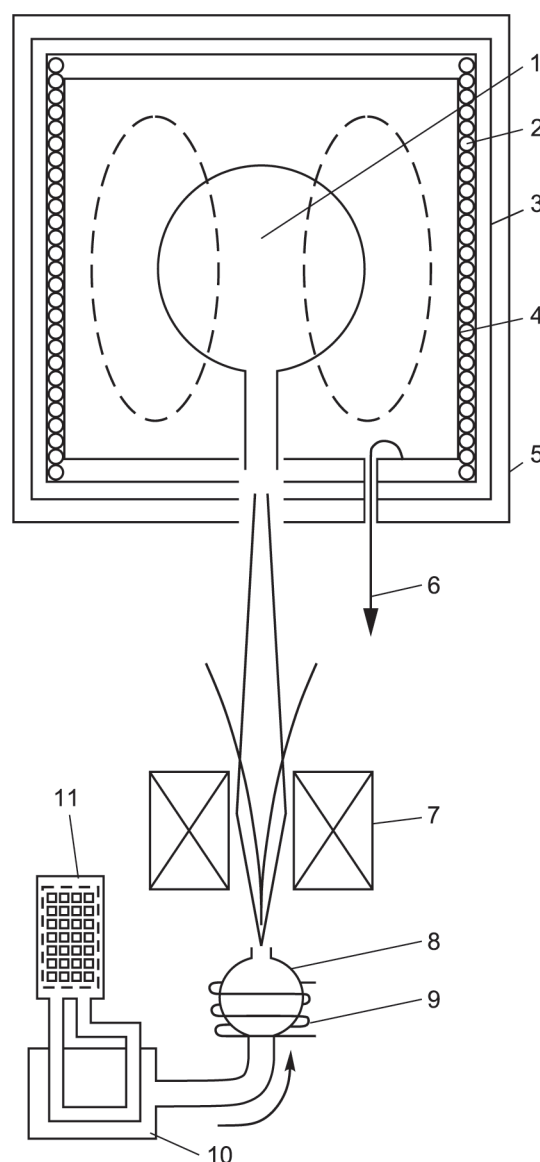


Рис. 1. Упрощённая схема бортового водородного генератора: 1 – накопительная колба; 2 – сверхвысокочастотный резонатор; 3 – магнитные экраны; 4 – соленоид подмагничивания; 5 – вакуумный колпак; 6 – петля связи; 7 – сортирующая система; 8 – разрядная колба; 9 – высокочастотный генератор; 10 – очиститель; 11 – источник молекулярного водорода

Полученные характеристики модели ВГ для космической обсерватории «Миллиметрон» позволили в 2–2,5 раза улучшить метрологические характеристики водородного стандарта частоты по сравнению с «РадиоАстроном», но и эти результаты не удовлетворили требованиям, указанным в техническом задании. Минимально возможная нестабильность частоты водородного генератора определяется его тепловым шумом и описывается выражением [3]:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{Q_0 \sqrt{P_r}} \sqrt{\frac{kT}{2}}, \quad (1)$$

где Q_0 – добротность спектральной линии; P_r – мощность

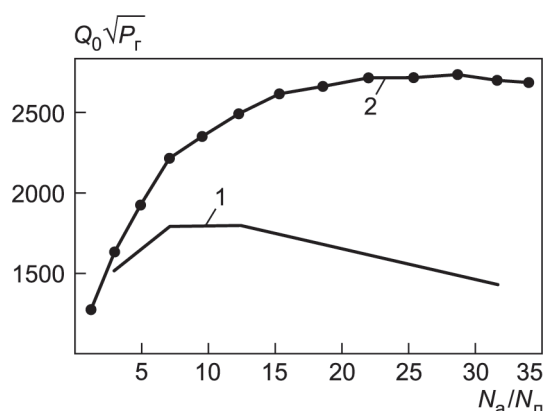


Рис. 2. Зависимость произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ от интенсивности пучка: 1, 2 – система двойной фокусировки выключена и включена, соответственно

генерации в резонаторе; k – постоянная Больцмана; T – температура резонатора.

Таким образом, для уменьшения кратковременной нестабильности частоты генератора необходимо добиваться максимального значения произведения $Q_0\sqrt{P_r}$. Зависимость мощности генерации и ширины линии ВГ от интенсивности пучка атомов водорода достаточно точно описываются выражениями [3]:

$$P_r = [-2q^2(N_a/N_n)^2 + (1-3q)(N_a/N_n) - 1]P_n; \quad (2)$$

$$\Delta f = (1 + q(N_a/N_n)) / (\pi T),$$

где P_r – мощность генерации; $q = K\alpha$ – параметр качества ВГ; K – коэффициент, зависящий от физических постоянных и ряда параметров ВГ; $\alpha = N/N_n$ – параметр сортировки атомов; N – полный поток атомов; N_n – поток активных атомов, поступающих в колбу; N_n – пороговый поток атомов; P_n – пороговая мощность генерации; Δf – ширина спектральной линии.

Т а б л и ц а 1
Зависимость произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ от интенсивности пучка при включённой и выключенной системе адиабатически быстрого прохождения атомов

N_a/N_n	Система АБП	
	выключена	включена
1	–	1274
3	1519	1635
5	–	1926
7	1792	2214
10	–	2350
12	1799	2494
15	–	2617
19	1673	2663
22	–	2712
25	1555	2716
29	–	2736
32	1435	2702
34	–	2686

При классической сортировке атомов водорода в пучке в накопительную колбу ВГ попадают атомы в двух квантовых состояниях $F=1$, $m_F=1$ и $F=1$, $m_F=0$. Первые не участвуют в генерации сигнала ВГ, но через механизм

спинобменных взаимодействий уширяют спектральную линию и препятствуют увеличению мощности генерации при увеличении интенсивности пучка. При этом коэффициент $\alpha \geq 2$. Для возможного повышения стабильности ВГ авторы настоящей статьи предложили получать пучок атомов водорода в одном квантовом состоянии $F=1$, $m_F=0$ методом двойной сортировки атомов по энергетическим уровням [4, 5]. В этом методе используются два последовательно расположенных сортирующих магнита. Пучок атомов проходит специально создаваемую между магнитами инверсионную область, в которой атомы с $m_F=1$ меняют знак проекции магнитного момента на $m_F=-1$. Далее атомы отсортировываются вторым магнитом, поэтому в накопительную колбу попадают только атомы в единственном состоянии $F=1$, $m_F=0$. Произведённая по формулам (2) оценка возможного улучшения характеристик ВГ показала, что при полном удалении атомов с $m_F=1$ из пучка ($\alpha=1$) максимальное значение произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ может увеличиться в 1,5–1,6 раза с соответствующим уменьшением нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами ВГ [6]. Было проведено математическое моделирование данной схемы сортировки с учётом распределения атомов по углам и скоростям их вылета из источника [7]. Причиной дополнительных трудностей стало жёсткое ограничение на общую длину системы двойной сортировки, необходимое для соблюдения требований по габаритным размерам прибора. Определялись оптимальные значения длины, внутреннего диаметра сортирующих магнитов и расстояние между ними для получения максимального соотношения активных и пассивных атомов в пучке. При заданных общих размерах сортирующей системы в 220 мм проведённые расчёты показали возможность получения на входе накопительной колбы пучка, содержащего порядка 95 % атомов с $m_F=0$.

Основная сложность при получении пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии (особенно при жёстком ограничении длины всей системы и присутствии полей рассеяния сортирующих магнитов) заключается в практическом создании условий для эффективной вероятности инверсионного перехода. Чувствительность этого процесса к посторонним неконтролируемым магнитным полям также затрудняет получение нужного пучка атомов. Поэтому попытки применить кажущийся более простым метод встречных полей не привели к положительному результату, и был использован метод адиабатически быстрого прохождения (АБП) [7]. В этом методе в экранированной от внешних магнитных полей области между сортирующими магнитами с помощью соленоида создаётся магнитное поле, параллельное оси пучка и монотонно изменяющееся по величине вдоль его оси. В центральной части соленоида создаётся переменное магнитное поле с частотой зеемановских переходов в атоме водорода, перпендикулярное оси пучка. При определённых условиях взаимодействие магнитного момента атома водорода с суперпозицией этих полей приводит к переориентации проекции магнитного момента атома на направление внешнего поля $m_F=1$ на $m_F=-1$. Метод АБП показал хорошую устойчивость к влиянию внешних полей. Экспериментально было получено увеличение произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ в 1,46 раза, что близко к теоретически возможному (рис. 2, табл. 1).

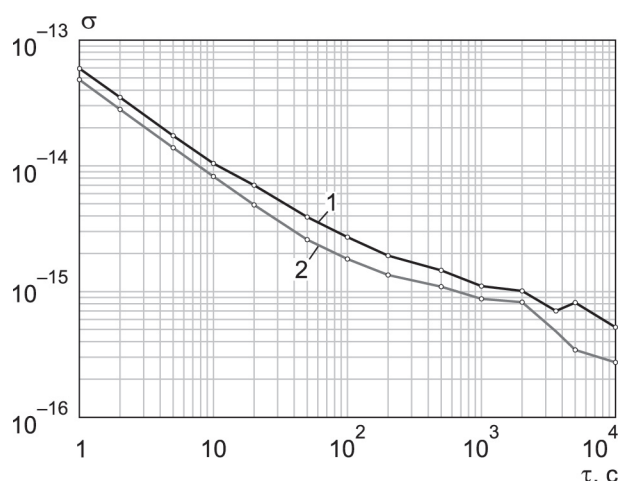


Рис 3. Нестабильность частоты σ водородного стандарта частоты с выключенной (1) и включенной (2) системой адиабатически быстрого прохождения

Если без включения системы двойной сортировки параметр качества ВГ оценивался как $q=0,06$, а $\alpha=2$, то включение этой системы привело к снижению этих значений до 0,031 и 1,04, соответственно, что свидетельствует о высокой эффективности перевода атомов в пучке из состояния с $m_F=1$ в состояние $m_F=-1$ в разработанной системе. Подстановка полученных значений мощности генерации и добротности спектральной линии в уравнение (1) позволяет оценить нестабильность частоты, вносимую тепловыми шумами резонатора на уровне $\sigma(\tau) = 1,74 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$

На рис. 3 и в табл. 2 приведены экспериментальные результаты по нестабильности частоты выходного сигнала 5 МГц разработанного макета бортового водородного стандарта частоты с выключенной и включенной системами АБП.

Из полученных результатов следует, что при $\tau \leq 10$ с не-

Таблица 2

Результаты измерения нестабильности частоты макета бортового водородного стандарта частоты с включенной и выключенной системой адиабатически быстрого прохождения атомов

Интервал времени измерений τ , с	Нестабильность частоты σ		
	Система АБП		Согласно техническому заданию для обсерватории «Миллиметрон»
	выключена	включена	
1	$6,00 \cdot 10^{-14}$	$4,90 \cdot 10^{-14}$	$\leq 7 \cdot 10^{-14}$
10	$1,05 \cdot 10^{-14}$	$8,30 \cdot 10^{-15}$	$\leq 1 \cdot 10^{-14}$
100	$2,73 \cdot 10^{-15}$	$1,83 \cdot 10^{-15}$	$\leq 2 \cdot 10^{-15}$
1000	$1,10 \cdot 10^{-15}$	$8,84 \cdot 10^{-16}$	$\leq 5 \cdot 10^{-16}$
3600	$7,10 \cdot 10^{-15}$	$4,86 \cdot 10^{-16}$	$\leq 5 \cdot 10^{-16}$

стабильность определяется в основном шумами кварцевого генератора и приёмника, а при $\tau \geq 1000$ с становится заметно влияние шумов системы настройки резонатора, АПЧ и внешних воздействий. И только при $\tau=30 \dots 200$ с результат близок к теоретическому пределу, определяемому тепловыми шумами резонатора.

Заключение. При достигнутой нестабильности опорного водородного стандарта частоты $\sigma(\tau)=1,9 \cdot 10^{-15}$ космический радиотелескоп «Миллиметрон» в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой в соответствии с формулой (1) сможет работать на частотах до 840 ГГц.

Литература

1. Belyaev A., Biriukov A., Demidov N., Likhacheva L., Medvedev S., Myasnikov A., Pavlenko Y., Sakharov B., Smirnov P., Storoyev E., Tulyakov A. Russian hydrogen masers for space applications // Proc. PTIT. Washington, 2–5 December, 2013. P. 87–93.
2. Воронцов В. Г., Демидов Н. А., Беляев А. А. Разработка новой модели водородного генератора с использованием системы АНР методом переключения частоты резонатора // Метрология времени и пространства: Материалы 6-го Междунар. симпозиума, Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 72–74.
3. Kleppner K., Goldenberg H. M., Ramsey N. F. Theory of hydrogen maser // Phys. Rev. 1962. V. 126. No. 2. P. 603–615. DOI: 10.1103/physrev.126.603.
4. Vessot R. F. C. State of the art and future directions of the atomic hydrogen maser // Proc. 22nd Precise Time and Time Interval (PTTI). Application and Planning Meeting. 1990.
5. Boyko A., Yolkin G., Gestkova N., Kurnikov G., Paramzin V. Hydrogen Maser with Improved Short-term Frequency Stability // Proc. 15th European Frequency and Time Forum. Neuchâtel, Switzerland: Swiss Foundation for Research in Microtechnology, 2001. P. 406–408.
6. Беляев А. А., Демидов Н. А., Поляков В. А., Тимофеев Ю. В. Оценка возможного уменьшения предельной нестабильности частоты водородного генератора при использовании пучка атомов в одном квантовом состоянии // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 28–31.
7. Поляков В. А., Беляев А. А., Демидов Н. А., Тимофеев Ю. В. Математическое моделирование системы сортировки пучка атомов водорода с целью повышения кратковременной стабильности частоты водородного генератора // Метрология времени и пространства: Материалы 6-го Междунар. симпозиума, Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 354–355.
8. Mattison E. M., Vessot R. F. C., Shen W. Single-state selection system for hydrogen masers // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1987. V. 34. Iss. 6. P. 622–628.

Дата принятия: 02.07.2018.