

Когерентное суммирование сигналов водородных стандартов частоты для повышения точности РСДБ-измерений

© А. В. Вытнов¹, К. Г. Мишагин², В. А. Поляков²

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
²ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

Реферат

В РСДБ точность измерений существенно зависит от нестабильности частоты опорного сигнала атомных часов. Наличие нескольких активных водородных стандартов в радиоастрономических обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» дает возможность использовать когерентное суммирование независимых сигналов с целью получения сигнала с уменьшенной нестабильностью частоты и уменьшенным фазовым шумом. Уменьшение кратковременной нестабильности частоты по сравнению с характеристиками отдельных водородных стандартов представляется наиболее актуальным для радиоинтерферометрических измерений в перспективном миллиметровом диапазоне длин волн.

В работе представлено описание некоторых экспериментов, проведенных в радиоастрономических обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская», а также в ЗАО «Время-Ч» по когерентному суммированию на пассивных элементах сигналов активных водородных стандартов. Частоты стандартов автоматически подстраивались либо взаимно, либо относительно одного из стандартов, участвующих в сложении, на основе данных измерений в многоканальном компараторе. При однонаправленной автоподстройке постоянная времени петли выбиралась больше максимального интервала времени измерения, на котором ожидалось получить уменьшение нестабильности суммарного сигнала. Оценка нестабильности частоты суммарного сигнала и отдельных суммируемых сигналов производилась с помощью измерений относительно независимого активного водородного стандарта.

Результаты экспериментов демонстрируют ожидаемые значения уменьшения нестабильности частоты, которые объясняются усреднением флуктуаций фазы при сложении близких по характеристикам независимых источников. Показано, что при суммировании сигналов двух водородных стандартов Ч1-1035 удается достичь нестабильности частоты $4 \cdot 10^{-14}$ при интервале времени измерения 1 с в шумовой полосе 3 Гц, при суммировании сигналов четырех таких стандартов получается нестабильность частоты порядка $3 \cdot 10^{-14}$. Также представлены результаты измерения кратковременной нестабильности частоты и спектральной плотности мощности фазовых шумов новых водородных стандартов частоты с двойной сортировкой атомов, демонстрирующие перспективы дальнейшего улучшения характеристик. Оценка нестабильности частоты одного такого стандарта составила $3.8 \cdot 10^{-14}$ при интервале времени измерения 1 с в полосе 0.5 Гц. Суммирование двух сигналов 5 МГц позволяет уменьшить уровень шума на 3 дБ и получить значение спектральной плотности мощности фазового шума -133 дБн/Гц при отстройке от несущей на 1 Гц.

Ключевые слова: когерентное сложение, синхронизация, автоподстройка частоты, нестабильность частоты, фазовый шум.

Контакты для связи: Мишагин Константин Геннадьевич (mishagin@vremya-ch.com).

Для цитирования: Вытнов А. В., Мишагин К. Г., Поляков В. А. Когерентное суммирование сигналов водородных стандартов частоты для повышения точности РСДБ-измерений // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 59. С. 9–13.
<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.59.9-13>

Coherent Combining of Signals of Hydrogen Masers for VLBI Measurement Improvement

A. V. Vytnov¹, K. G. Mishagin², V. A. Polyakov²

¹Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
²“Vremya-CH” JSC, Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract

Measurement accuracy in Very Long Baseline (VLBI) interferometry is crucially depend on the frequency stability of reference atomic clock signals. Each observatory of Quasar VLBI network contains several hydrogen masers, therefore coherent combining of independent signals can be used to obtain summary signal with improved frequency stability and reduced phase noise. Frequency stability better than single hydrogen maser should improve the accuracy of VLBI measurements in millimeter band.

Experiments on coherent combining of active hydrogen maser signals using passive elements, done in the observatories “Svetloe”, “Zelenchukskaya” and in “Vremya-Ch” JSC are described. Frequencies of masers were automatically

adjusted to each other or to a single maser of the ensemble using mutual measurements in multichannel comparator. In case of unidirectional synchronization to a single maser, control loop time constant value was selected more than the maximal averaging time for which frequency stability improvement of summary signal was expected. Frequency stability estimation for summary signal was done using measurements with respect to independent active hydrogen maser.

Results of the experiments comply with the results predicted by simple theory and explained by averaging of uncorrelated phase fluctuations of sources with similar statistical characteristics. It is shown that coherent combining of two hydrogen masers CH1-1035 allows achieving frequency stability of about $4 \cdot 10^{-14}$ at averaging time 1 s in 3 Hz noise band, in case of four signals frequency stability of summary signal is about $3 \cdot 10^{-14}$. The measurement results of frequency stability and phase noise power spectral density of new active hydrogen masers with a single state selection system promising further improvements of the characteristics are also shown. Estimation of the frequency stability for one maser of this type gives $3.8 \cdot 10^{-14}$ at 1 s in 0.5 Hz band. Coherent combining of two masers with single state selection system reduces noise level by 3 dB, so power spectral density of phase noise for 5 MHz is around -133 dBc/Hz for 1 Hz offset.

Keywords: coherent combining, synchronization, frequency locking, frequency stability, phase noise.

Contacts: Konstantin G. Mishagin (mishagin@vremya-ch.com).

For citation: Vytnov A. V., Mishagin K. G., Polyakov V. A. Coherent combining of signals of hydrogen masers for VLBI measurement improvement // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 59. P. 9–13.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.59.9-13>

Введение

В РСДБ используется корреляционная обработка измерений с нескольких радиотелескопов на интервалах времени, как правило до 1000 с. Для обеспечения когерентности на соответствующих временах интегрирования используются активные водородные стандарты частоты и времени. Типичная характеристика нестабильности частоты водородного стандарта $10^{-13} \cdot \tau^{-1/2}$, где τ — интервал времени измерения, является достаточной и почти не ограничивает точность радиоинтерферометрических измерений в диапазоне до 30 ГГц ([Nothnagel, et al., 2018](#)). Для более высоких частот принимаемых сигналов, в миллиметровом диапазоне длин волн, требования к кратковременной нестабильности частоты опорных стандартов становятся более жесткими. В работах ([Nand, et al., 2011](#); [Rioja, et al., 2012](#)) исследуется влияние нестабильности частоты на точность РСДБ-измерений в диапазоне частот 100–350 ГГц и обосновывается необходимость применения стандартов с характеристиками лучшими, чем у активных водородных стандартов на интервалах времени измерения до 100–1000 с. Данный диапазон представляется весьма перспективным, о чем свидетельствует развитие проекта космического радиоинтерферометра «Миллиметр» ([Карлашев и др., 2014](#)). К переходу в миллиметровый диапазон способствует развитие сетей 5G, которые создают помехи в широко используемых сейчас S- и K-диапазонах. Предлагаемые в работах ([Nand, et al., 2011](#); [Rioja, et al., 2012](#)) криогенные сапфировые генераторы имеют свои недостатки. Кроме сложности в обслуживании они не являются квантовыми стандартами и их характеристики долговременной нестабильности частоты не позволяют их использовать для решения задачи хранения и синхронизации шкал времени, которая также актуальна для РСДБ.

Наличие нескольких активных водородных стандартов в обсерваториях позволяет улучшить характеристики нестабильности частоты с помощью когерентного суммирования независимых сигналов. Многоканальные системы с когерентным сложением сигналов применяются в различных областях физики и техники, позволяя добиться рекордных значений мощности лазерного излучения ([Flores, et al., 2016](#)), улучшить характеристики атмосферных оптических линий связи ([Geisler, et al., 2016](#)), эффективнее использовать частотно-временной и пространственный ресурс в системах мобильной связи ([He, et al., 2018](#)). Для обеспечения когерентности сигналов необходимо решить задачу синхронизации отдельных стандартов. В работах ([Chang, et al., 1997](#), [Мишагин, et al., 2016](#)) рассматривается синхронизация в ансамблях взаимосвязанных генераторов и демонстрируется эффект уменьшения фазового шума. В работе ([Mishagin, Pelyushenko, 2021](#)) рассматривается как кратковременная, так и долговременная нестабильность частоты в ансамбле двух взаимосвязанных пассивных стандартов частоты. Показано, что взаимная связь может привести к дополнительным случайным блужданиям или к дополнительному дрейфу частоты синхронизированных генераторов. В связи с этим в данной работе рассмотрена однонаправленная синхронизация относительно одного из стандартов ансамбля. При этом постоянная времени петли автоподстройки выбрана достаточно большой, чтобы оставить некоррелированными фазовые флуктуации в диапазоне интервалов времени измерения, для которых требуется уменьшить нестабильность частоты суммарного сигнала. В работе ([Мишагин и др., 2016](#)) также рассмотрен способ уменьшения кратковременной нестабильности с помощью одновременной автоподстройки вспомогательного генератора относительно средней частоты нескольких

опорных стандартов. При таком способе уменьшение фазового шума ограничено полосой пропускания петли автоподстройки.

В данной работе представлены результаты нескольких экспериментов по когерентному объединению сигналов активных водородных стандартов частоты на пассивных сумматорах с сосредоточенными элементами. Частоты стандартов автоматически сводились, используя данные взаимных измерений на компараторах. Суммарный сигнал измерялся на компараторе относительно независимого активного водородного стандарта. Кроме того, была измерена кратковременная нестабильность частоты и спектральная плотность мощности фазового шума активного водородного стандарта с двойной сортировкой атомов (Audoin, et al., 1968, Поляков и др., 2018).

Описание экспериментов и полученных результатов

Эксперименты, проведенные в ЗАО «Время-Ч» и обсерваториях ИПА РАН «Светлое» и «Зеленчукская», имели схожую схему соединения приборов, которая представлена на рис. 1.

В экспериментах использовалось от двух до четырех активных водородных стандартов, сигналы которых измерялись на компараторе относительно «свободного» стандарта, не используемого в суммировании. На основе измерений вычислялись взаимные разности частот, которые использовались для автоподстройки частоты суммируемых стандартов. Коррекция кода частоты подстраиваемых стандартов осуществлялась с помощью дискретных приращений с шагом 10^{-16} и интервалом времени между коррекциями $\Delta t = 10$ с:

$$f_{k,n+1} = f_{k,n} + u_{k,n},$$

где f_k — код частоты k -го стандарта, n — номер момента времени.

Реализовано пропорционально-интегральное регулирование, которое в случае взаимной автоподстройки может быть записано следующим образом:

$$u_{k,n} = -k_i \sum_{l=1}^N y_{kl,n} - k_p \sum_{l=1}^N (y_{kl,n} - y_{kl,n-1}),$$

где y_{kl} — относительная разность частот k -го и l -го стандартов, k_i и k_p — интегральный и пропорциональный коэффициенты петли автоподстройки.

При подстройке относительно одного из стандартов (с номером l) управляющие воздействия записываются так:

$$u_{k,n} = -k_i y_{kl,n} - k_p (y_{kl,n} - y_{kl,n-1}).$$

После завершения переходного процесса автоподстройки частоты программа автоподстройки временно приостанавливалась и сигналы стан-

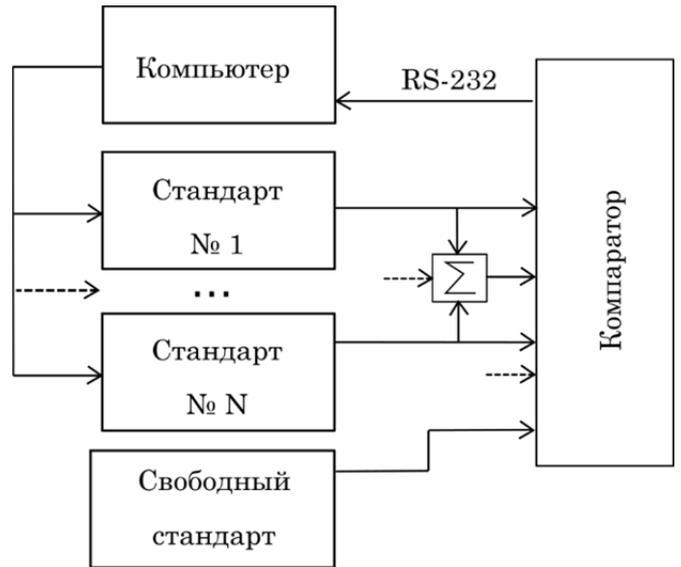


Рис. 1. Схема соединения приборов для проверки уменьшения нестабильности частоты суммарного сигнала нескольких стандартов

дартов вручную сводились по фазе путем введения сдвига частоты и наблюдения на осциллографе смещения фаз сигналов. После обеспечения синфазности сдвиг частоты исключался, выходные сигналы подключались к пассивному сумматору, а программа автоподстройки возобновляла свою работу. Использовались пассивные сумматоры на сосредоточенных элементах фирмы Mini Circuits с двумя и четырьмя входами. Суммарный сигнал также подавался на компаратор для измерения относительно свободного стандарта. При анализе данных исключался переходный процесс автоподстройки частоты. В качестве характеристики нестабильности частоты рассматривалась девиация Аллана или, согласно ГОСТ 8.567-2014, среднее квадратическое двухвыборочное отклонение измеренного значения меры частоты σ_y (СКДО). С помощью метода трех генераторов оценивались собственные нестабильности частоты суммируемых и свободного стандартов. Затем, измеряя СКДО разности суммарного сигнала и свободного стандарта, а также зная оценку СКДО свободного стандарта, вычислялась оценка СКДО суммарного сигнала. Погрешность СКДО, вносимая компаратором, не учитывалась в расчетах, так как она значительно меньше оцениваемой нестабильности частоты (для Ч7-315 измеренная погрешность каждого канала менее $1.5 \cdot 10^{-14}$ за 1 с). Таким образом, схема измерения относительно независимого стандарта позволяет сравнивать нестабильность частоты суммарного сигнала и нестабильности частот отдельных суммируемых сигналов.

В обсерваториях ИПА РАН «Светлое» и «Зеленчукская» проводились измерения на одинаковых комплектах аппаратуры. Для суммирования сигналов использовались водородные стандарты

Ч1-1035, обладающие улучшенными характеристиками кратковременной нестабильности частоты. В качестве свободного стандарта использовался водородный стандарт Ч1-1003М. Сигналы измерялись на компараторе фазовом многоканальном Ч7-315 в полосе 3 Гц. Осуществлялась однонаправленная автоподстройка с постоянной времени, большей 100 с ($k_i = 0.01$, $k_p = 0$). Продолжительность измерений — более 10000 с.

Результаты обработки измерений представлены на рис. 2. Уменьшение нестабильности частоты суммарного сигнала соответствует ожидаемому значению в $\sqrt{2}$ раз. Существенный разброс значений можно объяснить использованием в качестве независимого источника сигнала стандарта с худшей кратковременной нестабильностью, чем у суммируемых сигналов. Тем не менее эффект уменьшения при когерентном суммировании наблюдается устойчиво. Величина СКДО суммарного сигнала двух Ч1-1035 для $\tau = 1$ с составляет $\sigma_y \approx 4 \cdot 10^{-14}$ (полоса 3 Гц), для $\tau = 100$ с $\sigma_y \approx 2 \cdot 10^{-15}$.

В экспериментах в ЗАО «Время-Ч» осуществлялось суммирование четырех стандартов Ч1-1035. В качестве свободного стандарта использовался активный водородный стандарт с двойной сортировкой атомов VG-160, обладающей ещё меньшей как кратковременной, так и долговременной характеристиками нестабильности частоты. Осуществлялась взаимная автоподстройка с постоянной времени большей 100 с ($k_i = 0.01$, $k_p = 0.01$). Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Величина СКДО суммарного сигнала четырех Ч1-1035 для $\tau = 1$ с составляет $\sigma_y \approx 3 \cdot 10^{-14}$ (полоса 3 Гц), для $\tau = 100$ с: $\sigma_y \approx 1.4 \cdot 10^{-15}$.

Водородные стандарты с системой двойной сортировки атомов благодаря повышенной мощности генерации обладают заметно меньшей кратко-

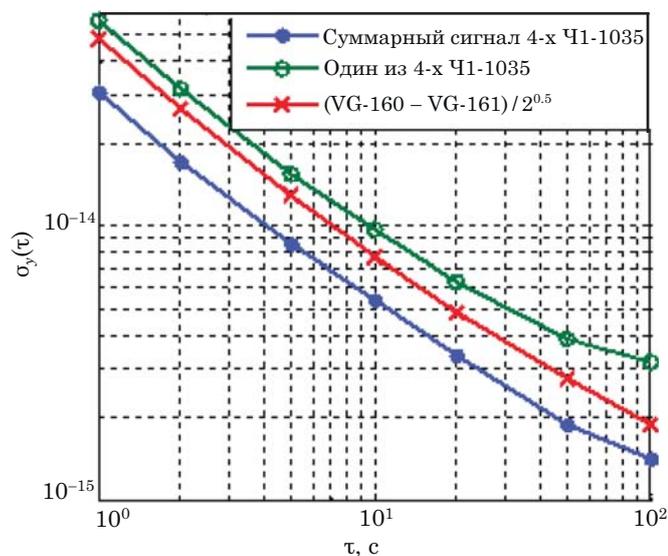


Рис. 2. Результат оценки нестабильности частоты суммарного сигнала двух стандартов частоты Ч1-1035

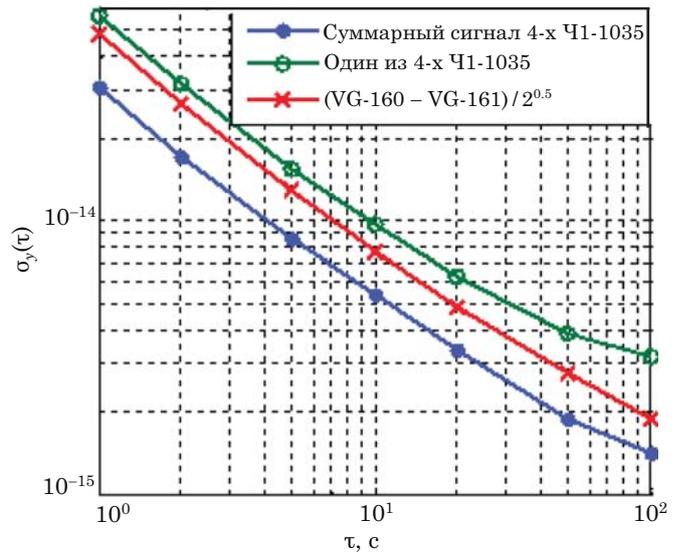


Рис. 3. Результат оценки нестабильности частоты суммарного сигнала четырех стандартов частоты Ч1-1035

временной нестабильностью частоты. На рис. 3 представлен результат оценки собственной величины СКДО стандарта с двойной сортировкой на основе взаимных сравнений двух таких приборов. Величина СКДО для $\tau = 1$ с составляет $\sigma_y < 5 \cdot 10^{-14}$ (полоса 3 Гц), для $\tau = 100$ с — $\sigma_y < 2 \cdot 10^{-15}$. Стоит отметить, что при измерении СКДО на интервале времени $\tau = 1$ с существенное значение имеет шумовая полоса пропускания компаратора. Для сравнения кратковременная нестабильность частоты двух стандартов с двойной сортировкой атомов друг относительно друга была измерена с помощью компаратора-анализатора фазового VCH-323 и анализатора фазовых шумов Microsemi 5120A-01 в полосе 0.5 Гц.

Величина СКДО для каждого стандарта в отдельности составила $\sigma_y \approx 3.77 \cdot 10^{-14}$ при погрешности на уровне 10 менее 1 % для времени наблюде-

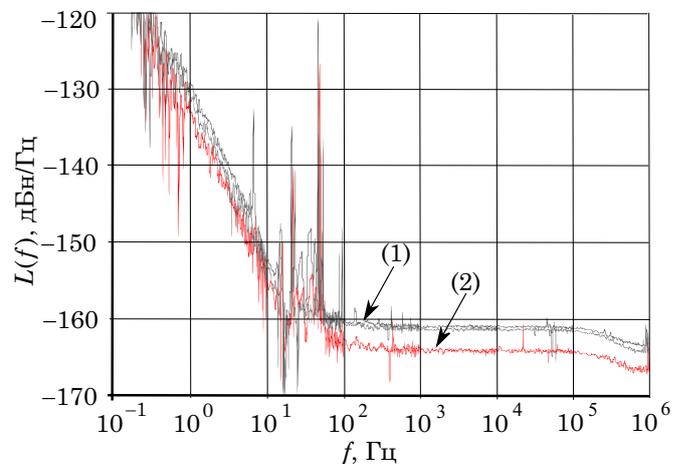


Рис. 4. Спектральные плотности мощности фазового шума отдельных стандартов с системой двойной сортировки атомов (1) и суммарного сигнала этих стандартов (2)

ния порядка одного часа. Отклонение показаний двух разных приборов также не превысило 1 %. Таким образом, при когерентном суммировании сигналов двух стандартов с системой двойной сортировки атомов можно ожидать $\sigma_y(\tau = 1 \text{ с}) \approx 2.7 \cdot 10^{-14}$.

На рис. 4 представлены графики односторонней спектральной плотности мощности фазового шума суммарного сигнала и в отдельности для двух стандартов с системой двойной сортировки атомов. Уменьшение уровня шума составило ожидаемые -3 дБ. При отстройке от несущей 1 Гц уровень фазового шума суммарного сигнала 5 МГц составил -133 дБн/Гц.

Заключение

Проведенные эксперименты показывают реализуемость когерентного суммирования сигналов водородных стандартов частоты в обсерваториях радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО». Существующее в настоящее время оборудование обсерваторий позволяет уменьшить кратковременную нестабильность частоты сигнала синхронизации до уровня $\sigma_y(\tau = 1 \text{ с}) \approx 4 \cdot 10^{-14}$ в полосе 3 Гц.

Активные водородные стандарты с системой двойной сортировки атомов демонстрируют уникальные характеристики кратковременной нестабильности частоты и спектральной плотности мощности фазового шума в своем классе приборов. Представляется перспективным использование таких стандартов в радиоинтерферометрических измерениях в миллиметровом диапазоне длин волн.

Благодарность

Авторы выражают благодарность руководству компании ЗАО «Время-Ч», а также лично Демидову Н. А. за поддержку и интерес к проведенной работе.

Литература

Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллимет-

рон // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 12. С. 1319–1352.

Мишагин К. Г., Чернышев И. Н., Сахаров др. Б. А. Использование синхронизации для уменьшения фазового шума в группе прецизионных генераторов // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 36. С. 9–14.

Поляков В. А., Беляев А. А., Демидов Н. А., Тимофеев Ю. В. Система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям для промышленного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 31–36.

Audoin C., Desaintfuscien M., Petit P., et al. Design of a double focalization in a hydrogen maser // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1968. Vol. 17, no. 4. С. 351–353.

Chang H.-C., Cao X., Mishra U. K. Phase noise in coupled oscillators: theory and experiment // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. 1997. Vol. 45, no. 5. P. 604–615.

Flores A., Dajani I., Holten R. H., et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers // Optical Engineering. 2016. Vol. 55, no. 9. P. 096101.

Geisler D. J., Yarnal T. M., Stevens M. L., et al. Multi-aperture digital coherent combining for free-space optical communication receivers // Optics Express. 2016. Vol. 24, no. 12. P. 12661–12671.

He Q., Wang Z., Hu J., et al. Performance gains from cooperative MIMO radar and MIMO communication systems // IEEE Signal Processing Letters. 2018. Vol. 26, no. 1. P. 194–198.

Mishagin K. G., Pelyushenko A. V. Mutual synchronization of passive hydrogen masers // Proceedings of EFTF-IFCS-2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/354118217_Mutual_Synchronization_of_Passive_Hydrogen_Masers (accessed: 01.10.2021).

Nand N. R., Hartnett J. G., Ivanov E. N., Santarelli G. Ultra-stable very-low phase-noise signal source for very long baseline interferometry using a cryocooled sapphire oscillator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2011. Vol. 59, no. 11, P. 2978–2986.

Nothnagel A., Nilsson T., Schuh H. Very long baseline interferometry: dependencies on frequency stability // Space Science Reviews. 2018. Vol. 214, no. 3. P. 1–15.

Rioja M., Dodson R., Asaki Y., et al. The impact of frequency standards on coherence in VLBI at the highest frequencies // The Astronomical Journal. 2012. Vol. 144, no. 4. P. 121.