

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ МГНОВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

В статье предложен новый способ измерения частоты на основе однобитного аналого-цифрового преобразователя. В отличие от известного способа измерения частоты с использованием линии задержки, разработанная структурная схема измерителя, реализующая предложенный способ, позволяет избавиться от линий задержки для измерения частоты в широком диапазоне частот и резко сократить массогабаритные параметры всего измерителя при интегральной реализации. В отличие от других известных цифровых измерителей, данные о которых имеются в печатных источниках, предложенный способ позволяет повысить точность измерения частоты в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: мгновенное измерение частоты, однобитное аналого-цифровое преобразование, линия задержки, фазовращатель, микросхема мгновенного измерения частоты.

Актуальность. История появления устройств для мгновенного измерения частоты (МИЧ) уходит в далекий 1958 год [1, 2]. Предложенная идея измерения частоты была реализована в структуре измерителя на основе линии задержки. В классическом методе измерения частоты на основе линии задержки сигнал с частотой f разветвляется на два канала — прямой и с линией задержки. Если величина задержки равна τ , то разность фаз между двумя сигналами будет равна $d\theta = 2\pi f\tau$. Таким образом, если разность фаз между этими двумя сигналами сравнивается с помощью фазового компаратора, результат будет пропорционален частоте сигнала. Такому способу измерения частоты посвящены многие работы [2–16]. Классические структурные решения для измерения частоты обладают рядом недостатков — при их реализации в узкой полосе частот измерители могут быть относительно компактны и просты, при этом на низких частотах размеры линии задержки имеют значительные размеры [15, 17, 18]. Также устройствам на линии задержки свойственны неопределенности в определении фазы, что решается внесением в структуру измерителя дополнительных линий задержки [6, 9, 14], что приводит к увеличению массогабаритных параметров. А современная тенденция в формировании требований к устройству как раз противоположная и заключается в стремлении реализовать весь измеритель частоты в интегральном виде на одном кристалле. Один из способов увеличения диапазона рабочих частот реализуется в DIFM-структурах (сокращение «DIFM» означает «Digital Instantaneous Frequency Measurement Receivers» («цифровой приемник для

мгновенного измерения частоты»)). Такие структуры представляют собой несколько параллельно соединенных узкополосных измерителей, каждый из которых содержит фазовый дискриминатор, линию задержки различной длины и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Обязательным элементом DIFM-структуры является разветвитель на несколько каналов, который вносит значительные потери в тракте при большом количестве узкополосных измерителей [19–21]. Линии задержки в структуре DIFM обычно имеют геометрическое соотношение длин, а оцифрованные значения фаз сигналов на выходе линий задержек обрабатываются для обеспечения высокой точности и устойчивости к системным ошибкам. Самая длинная линия задержки определяет точность частоты, ограниченную характеристиками измерения фазы первым фазовым дискриминатором, тогда как более короткие линии постепенно разрешают неопределенности измерения фазы более длинной линии. Цифровые устройства МИЧ типа DIFM являются направлением, с помощью которого расширяют полосу рабочих частот. Такие структурные решения (DIFM) также отличаются громоздкостью, поскольку не исключают необходимость применять линии задержки [16]. Хотя DIFM широко распространены, поскольку идея параллельного соединения узкополосных каналов позволяет перекрыть большой диапазон частот, выполнить унификацию подканалов при обеспечении высокой точности измерения частоты, современная тенденция в технике МИЧ заключается в отказе от традиционных структур с целью минимизации аналоговых пассивных ком-



Рис. 1. Структурная схема цифрового измерителя частоты

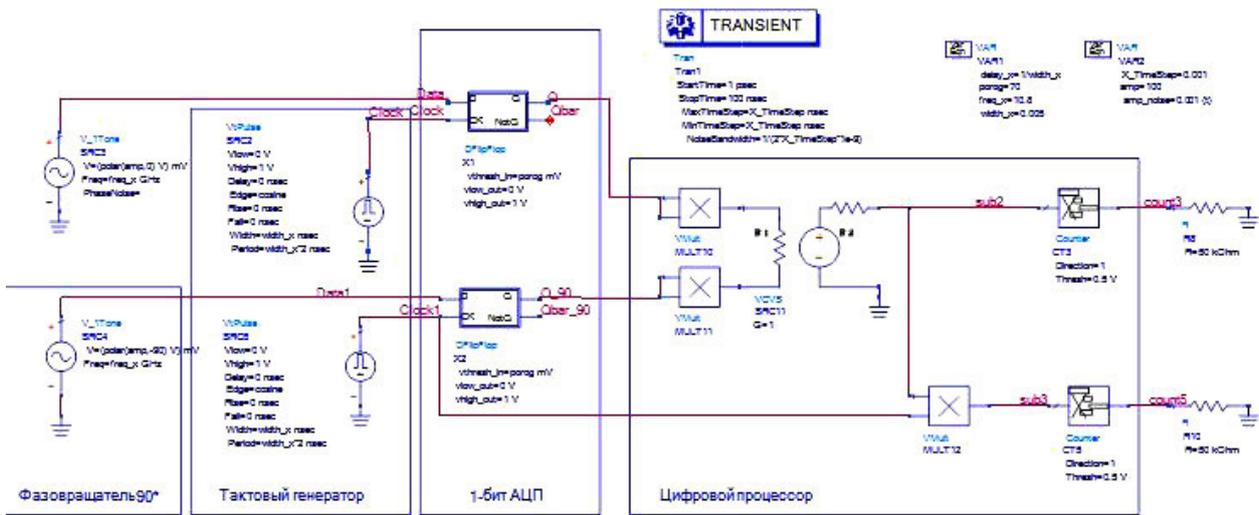


Рис. 2. Модель цифрового измерителя частоты в САПР ADS Keysight

понентов, таких как фазовращатели, линии задержки, многоканальные СВЧ разветвители. Современная структура МИЧ приемника — это структура на основе однобитного АЦП [2, 11]. Анализ литературных источников показал, что в релевантных статьях описываются общие идеи по реализации таких измерителей, анализ и исследование факторов принципиально ограничивающих параметры отсутствуют. Частично проблематика по обработке сигналов в цифровой структуре с АЦП описана в [22–26], а возможности применения однобитных АЦП в [27–39]. Поэтому считаем актуальным решение задач: разработка структуры цифрового измерителя; формирование алгоритма всей процедуры измерения; исследование структуры цифрового измерителя на идеализированных компонентах на предмет потенциально ограничивающих факторов.

Методология. Цель статьи — предложить новый способ измерения частоты с минимальным набором аналоговых компонентов, таких как линии задержки и фазовращатели для минимизации массогабаритных параметров. Структурная схема измерителя представлена на рис. 1. Структура состоит из однобитного АЦП, который в простейшем случае представляет собой тактируемый *D*-триггер, СВЧ источника тактовых импульсов, фазовращателя входного сигнала на 90° и цифрового процессора, который на основе выполнения обработки двух потоков данных формирует данные о значении частоты входного сигнала.

Исследование структуры цифрового измерителя частоты. Модель на идеализированных компо-

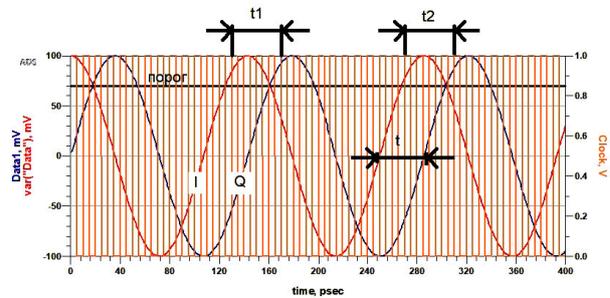


Рис. 3. К определению частоты входного сигнала

нентах цифрового измерителя частоты, реализованная в САПР (ADS Keysight (2021)), приведена на рис. 2. Модель содержит два источника гармонических сигналов, один из которых сдвинут на 90° относительно другого — два источника с фазовым сдвигом реализуют фазовращатель ВЧ сигнала в структурной схеме на рис. 1. Гармонические сигналы поступают на два тактируемых *D*-триггера с логическими выходами 0 В и 1 В, порог срабатывания триггера (переменная *porog* на рис. 2) задается в списке переменных VAR1 и меняется при исследовании. Источники тактовых импульсов *VtPulse* идентичные, период следования импульсов *width_x2* задается через переменную *width_x* в списке VAR1. На выходах триггеров формируются тактированные квадратурные сигналы, сдвинутые по фазе на 90° . Компоненты *VMult* выполняют функцию перемножения сигналов, перемножители *VMult* в позициях

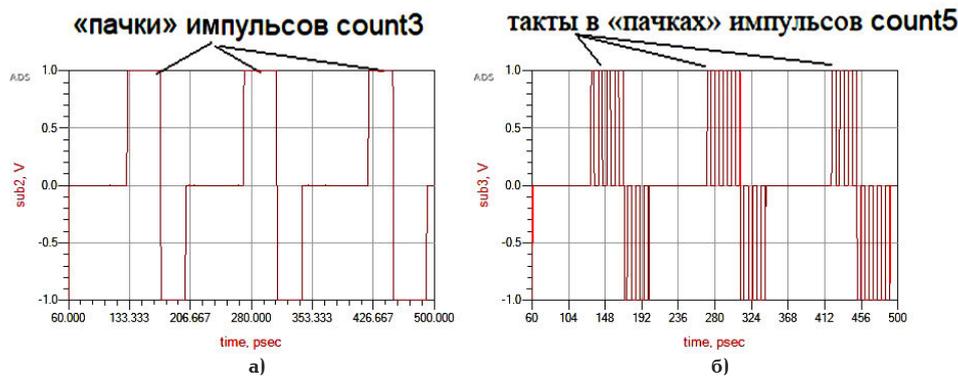


Рис. 4. Осциллограммы сигналов sub2, sub3 на рис. 2

MULT10 и MULT11 являются буферными повторителями для корректной работы источника напряжения управляемого напряжением VCVS. В модели (рис. 2) MULT10, MULT11 и VCVS реализуют функцию разности цифровых квадратур (сигналы Q и Q_{-90} на рис. 2). Компоненты Counter выполняют подсчет импульсов — регистрируется количество фронтов импульсов с порогом 0,5 В. Основная задача измерителя заключается в определении времени между первым импульсом в канале I и первым импульсом в канале Q в соответствии с рис. 3. Так как сдвиг по фазе между сигналами I и Q составляет 90° , то определив количество тактовых импульсов, которые заполняют этот промежуток времени ($t1$ или $t2$), и, умножив на четыре, можно определить период (и, соответственно, частоту) входного сигнала. Количество тактовых импульсов, которые заполняют интервалы $t1$, $t2$ и последующие интервалы для входного гармонического сигнала (в идеализированной модели без учета множественных факторов, связанных с не идеальностями отдельных реальных узлов схемы) определяется соотношением значения измеряемой частоты и длительности тактовых импульсов, порога срабатывания. Наиболее неопределенная ситуация с измерением частоты (рис. 2) может возникнуть, когда значение измеряемой частоты **близко** к частоте следования тактовых импульсов и порог срабатывания D -триггера **близок** к амплитудному значению входного гармонического сигнала. В предложенной модели для минимизации влияния указанных эффектов за **большое** время наблюдения (в работе время наблюдения 20 нс) выполняется подсчет: общего количества тактовых импульсов; числа интервалов или «пачек» импульсов $t1$, $t2$, ..., N ; общего числа тактовых импульсов, которые заполняют интервалы $t1$, $t2$, ..., N . Осциллограммы «пачек» импульсов и их заполнение показано на рис. 4 — сигнал sub2 является результатом вычитания квадратур $sub2 = Q - Q_{-90}$ (рис. 2), сигнал sub3 является результатом наполнения сигнала разности sub2 тактовыми импульсами. Далее в цифровом процессоре (рис. 2) выполняется определение среднего значения числа тактовых импульсов $\langle K_{имп} \rangle$ на интервал t как отношение числа тактов в «пачках» count5 (рис. 4б) к числу «пачек» count3 (рис. 4а), перемножение значения $\langle K_{имп} \rangle$ на длительность одного такта (в модели на рис. 2 это значение width_x·2) и определение частоты входного сигнала определяется как $f = 1/(\langle K_{имп} \rangle \cdot width_x \cdot 2 \cdot 4)$. В цифровом процессоре также выполняется коррекция значения частоты входного сигнала.



Рис. 5. Отклонение частоты измерителя без цифровой коррекции при разных тактовых частотах и уровнях ограничения в широком диапазоне частот

На рис. 5 показано отклонение частоты измерителя без цифровой коррекции при разных тактовых частотах в широком диапазоне частот от 0,76 ГГц до 18 ГГц при величине амплитуды входного сигнала 100 мВ:

- freq_50G_10m_model — порог ограничения 10 мВ, тактовая частота 50 ГГц;
- freq_50G_70m_model — порог ограничения 70 мВ, тактовая частота 50 ГГц;
- freq_100G_10m_model — порог ограничения 10 мВ, тактовая частота 100 ГГц;
- freq_100G_70m_model — порог ограничения 70 мВ, тактовая частота 100 ГГц.

В соответствии с графиком на рис. 5 отклонение частоты в нижней части диапазона наименьшее (при частоте входного сигнала 0,76 ГГц отклонение составляет минус 25 МГц для зависимости freq_50G_70m_model и минус 6 МГц для зависимости freq_50G_10m_model) и увеличивается значительно на верхней частоте 18 ГГц. При этом при тактовой частоте 50 ГГц система «насыщается» и теряет способность определять значение частоты входного сигнала свыше примерно 12 ГГц.

На рис. 6–7 показаны зависимости значений частоты измерителя без цифровой коррекции от порога D -триггера при частоте входного сигнала 2,4 ГГц и 10,8 ГГц при разных тактовых частотах (50 и 100 ГГц):

- fs50G_f2_4G — тактовая частота $fs = 50$ ГГц на частоте $f = 2,4$ ГГц;
- fs100G_f2_4G — тактовая частота $fs = 100$ ГГц на частоте $f = 2,4$ ГГц;
- fs50G_f10_8G — тактовая частота $fs = 50$ ГГц на частоте $f = 10,8$ ГГц;

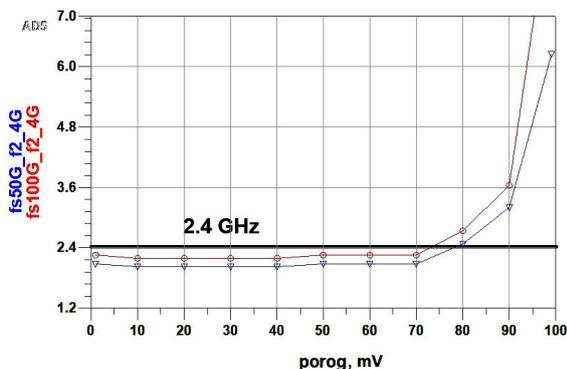


Рис. 6. Зависимость значения частоты измерителя без цифровой коррекции от порога D-триггера при частоте 2,4 ГГц

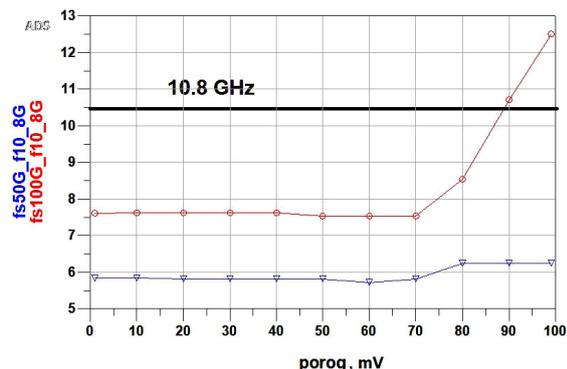


Рис. 7. Зависимость значения частоты измерителя без цифровой коррекции от порога D-триггера при частоте 10,8 ГГц

— $fs_{100G_f10_8G}$ — тактовая частота $fs = 100$ ГГц на частоте $f = 10,8$ ГГц.

Данные зависимостей на рис. 6–7 позволяют сделать важный вывод о том, что предложенная модель измерения частоты практически не чувствительна к порогу ограничения, то есть динамический диапазон входного сигнала может быть расширен по сравнению с известными измерителями частоты на основе линии задержки, которые требуют на входе наличие усилителя-ограничителя.

Повышение точности измерения частоты в предложенной модели реализуется за счет цифровой коррекции. На рис. 8 показана зависимость среднего количества накопленных тактовых импульсов

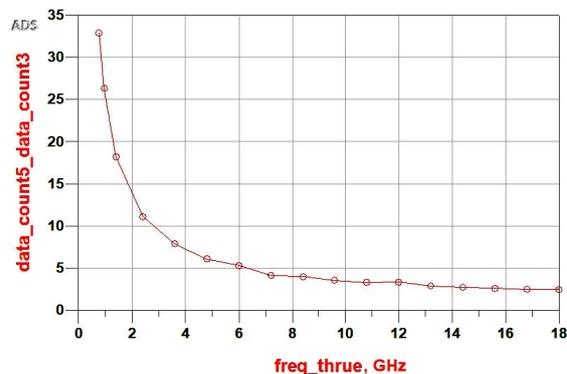
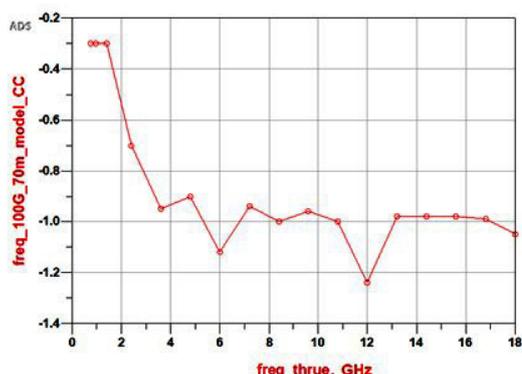


Рис. 8. Среднее количество накопленных тактовых импульсов $\langle K_{умп} \rangle$ за время наблюдения 20 мс в широком диапазоне частот на один интервал времени t (рис. 3)

$\langle K_{умп} \rangle$ за время наблюдения 20 мс в широком диапазоне частот на один интервал времени t (рис. 3) для тактовой частоты 100 ГГц и пороге ограничения 70 мВ. Если скорректировать значение $\langle K_{умп} \rangle$, можно значительно повысить точность измерения частоты. График зависимости и корректирующие коэффициенты показаны на рис. 9.

На рис. 10 показана зависимость значения частоты при тактовой частоте 100 ГГц и пороге ограничения 70 мВ без коррекции (кривая «а», рис. 10), с двухдиапазонной коррекцией в нижней части диапазона с коэффициентом минус 0,3 и в верхней со средним значением минус 0,868 (кривая «б», рис. 10) и многочастотной коррекцией для каждой частотной точки в соответствии с рис. 9 (кривая «в», рис. 10). На рис. 11 показано, что отклонение частоты при применении цифровой коррекции составляет плюс 20 минус 70 МГц и может быть еще уменьшено за счет уточнения коэффициентов коррекции.

Заключение. Предложенная структура цифрового измерителя частоты позволяет выполнить мгновенное измерение частоты в сверхшироком диапазоне частот с минимальным количеством тактовых импульсов, как линии задержки и фазовращатели, которые, при практической интегральной реализации в сантиметровом диапазоне длин волн, могут занимать на кристалле значительную площадь. Исследование модели измерителя в САПР показало, что предложенная структура на базе одноканального АЦП линейна с точки зрения уровня ВЧ сигнала, который необходимо обеспечить на входе и, благодаря этому свойству, не требует



freq_thru	freq_100G_70m_model_CC
0.760	-0.300
0.960	-0.300
1.400	-0.300
2.400	-0.700
3.600	-0.950
4.800	-0.900
6.000	-1.120
7.200	-0.940
8.400	-1.000
9.600	-0.960
10.800	-1.000
12.000	-1.240
13.200	-0.980
14.400	-0.980
15.600	-0.980
16.800	-0.990
18.000	-1.050

Рис. 9. Значения коэффициентов частотной коррекции

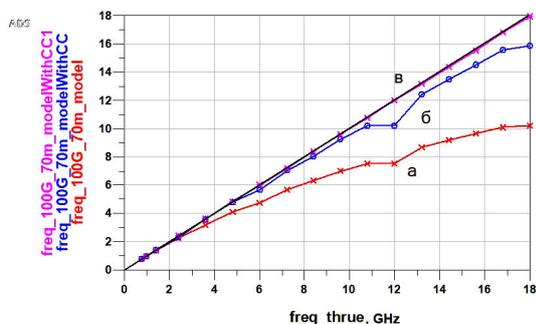


Рис. 10. Значение частоты при высокой тактовой частоте без коррекции (кривая «а»), с двухдиапазонной коррекцией (кривая «б») и мультиспектральной коррекцией (кривая «в») при пороге ограничения 70 мВ



Рис. 11. Отклонение частоты при тактовой частоте 100 ГГц, мультиспектральной коррекцией и пороге ограничения 70 мВ

на входе сложного и многокаскадного усилителя-ограничителя как в измерителе на основе линии задержки. Принципиальным ограничением по рабочему диапазону частот сверху является значение частоты тактового генератора. Так, исследование модели предложенной структуры измерителя показало, что при использовании тактового генератора 100 ГГц и цифровой коррекции диапазон рабочих частот сверху может быть не менее 18 ГГц. При этом точность измерения частоты во многом определяется точностью и количеством корректирующих коэффициентов. Необходимо отметить, что реализация СВЧ генераторов с частотами десятки ГГц находится на переднем крае научно-технологических достижений. Разработка и изготовление таких сверхвысокочастотных генераторов выполняется с использованием современных технологий, например, БиКМОП (BiCMOS) на основе кремний-германиевых (SiGe) структур. Можно считать, что предложенная методика позволяет измерять частоту реального входного сигнала с высокой точностью, а также позволяет проводить оптимизацию времени и точности измерения по критериям удовлетворения требованиям технического задания на уровне программного обеспечения.

Библиографический список

1. Bendat J. S. Principle and Applications of Random Noise Theory. New York: Wiley, 1958. 431 p.
2. East P. W. Fifty years of instantaneous frequency measurement // IET Radar, Sonar & Navigation. 2012. No. 6. P. 112–122. DOI:10.1049/iet-rsn.2011.0177.

3. Collins J. H., Grant P. M. A review of current and future components for electronic warfare receivers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1981. Vol. 28, no. 3. P. 117–125. DOI: 10.1109/T-SU.1981.31234.
4. Blerkom R. Van, Freeman D. G., Crutchfield R. C. Frequency Measurement Techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1968. Vol. 17, no. 2. P. 133–145. DOI: 10.1109/TIM.1968.4313684.
5. Василенко В. Э., Дикарев Б. Д., Зикий А. Н. [и др.]. Экспериментальное исследование приёмника мгновенного измерения частоты // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 3 (80). С. 168–171. EDN: KNOFGV.
6. Kvachev M. A., Puzyrev P. I., Semenov K. V. Research of Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306185.
7. Егоров Н., Кочемасов В. Мгновенное измерение частоты: методы и средства // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № 5 (00165). С. 136–141. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141. EDN: YTXAT.
8. Mazim N. J. N. B., Ain M. F., Hassan S. I. S. ADS simulation of 2 to 5 GHz IFM correlator // 2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics. Johor, Malaysia, 2005. P. 203–206. DOI: 10.1109/APACE.2005.1607807.
9. Gruchala H., Czyzewski M. The instantaneous frequency measurement receiver in the complex electromagnetic environment // 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No. 04EX824). Warsaw, Poland, 2004. Vol. 1. P. 155–158. DOI: 10.1109/MIKON.2004.1356885.
10. Lam D., Buckley B. W., Lonappan C. K. [et al.]. Ultra-wideband instantaneous frequency estimation // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015. Vol. 18, no. 2. P. 26–30. DOI: 10.1109/MIM.2015.7066680.
11. Pandolfi C., Fitini E., Gabrielli G. [et al.]. Comparison of analog IFM and digital frequency measurement receivers for electronic warfare // The 7th European Radar Conference. Paris, France, 2010. P. 232–235.
12. Thornton M. J. Ultra-broadband frequency discriminator designs for IFM receivers // IEE Colloquium on Multi-Octave Active and Passive Components and Antennas. London, UK, 1989. P. 13/1–13/4.
13. Goavec A., Vauché R., Gaubert J. [et al.]. Instantaneous frequency measurement for IR-UWB signal in CMOS 130 nm // 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Monte Carlo, Monaco, 2016. P. 157–160. DOI: 10.1109/ICECS.2016.7841156.
14. Rahimpour H., Masoumi N. Design and Implementation of a High-Sensitivity and Compact-Size IFM Receiver // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, no. 7. P. 2602–2609. DOI: 10.1109/TIM.2018.2866312.
15. Wu Ruey-Beei, Chao Fang-Lin. Flat spiral delay line design with minimum crosstalk penalty // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B. 1996. Vol. 19, no. 2. P. 397–402. DOI: 10.1109/96.496044.
16. Rahimpour H., Masoumi N. High-Resolution Frequency Discriminator for Instantaneous Frequency Measurement Subsystem // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. Vol. 67, no. 10. P. 2373–2381. DOI: 10.1109/TIM.2018.2816804.
17. Rahimpour H., Masoumi N., Keshani S. [et al.]. A High Frequency Resolution Successive-Band Shifted Filters Architecture for a 15-bit IFM Receiver // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, no. 5. P. 2028–2035. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2904259.
18. Rahimpour H., Masoumi N. A 6-bit Instantaneous Frequency Discriminator Based on Band-Stop Resonators // 2018 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Mashhad, Iran, 2018. P. 255–259. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472583.
19. Fields T. W., Sharpin D. L., Tsui J. B. Digital channelized IFM receiver // 1994 IEEE MTT-S International Microwave

Symposium Digest (Cat. No. 94CH3389-4). San Diego, CA, USA, 1994. P. 87–90. DOI: 10.1109/NTC.1994.316686.

20. Yingjiao R., Wenfang L. Research on Digital Instantaneous Frequency Measurement Based on Passive Positioning System // 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China, 2018. P. 1008–1012. DOI: 10.1109/CompComm.2018.8780982.

21. Su Yu, Jiang Defu. Digital Instantaneous Frequency Measurement of a Real Sinusoid Based on Three Sub-Nyquist Sampling Channels // Mathematical Problems in Engineering. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. DOI: 10.1155/2020/5089761.

22. Keshani S., Masoumi N. Improved Frequency Accuracy of IFM Using Minimum Mean Squared Error Algorithm // Electrical Engineering (ICEE). Mashhad, Iran, 2018. P. 260–264. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472591.

23. Keshani S., Masoumi N., Rahimpour H. [et al.]. Digital Processing for Accurate Frequency Extraction in IFM Receivers // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, no. 9. P. 6092–6100. DOI: 10.1109/TIM.2020.2969063.

24. Hirai A., Tsutsumi K., Tsuru M. [et al.]. A 0.1-to-10 GHz Digital Frequency Discriminator IC with Time to Digital Converter and Adaptive Control of Frequency Division Ratio for Instantaneous Frequency Measurement // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Boston, MA, USA, 2019. P. 1287–1290. DOI: 10.1109/MWSYM.2019.8700846.

25. Wang C., Li Y., Li K. A High-precision FFT Frequency Offset Estimation Algorithm based on Interpolation and Binary Search // 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, China, 2019. P. 437–442. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729465.

26. Kanai H., Chubachi N., Suzuki H. A method to evaluate accuracy of FFT-based periodicity analysis for short length signal in low SNR // [Proceedings] ICASSP-92: 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. San Francisco, CA, USA, 1992. Vol. 5. P. 45–48. DOI: 10.1109/ICASSP.1992.226662.

27. Lee Soon-Woo, Kang Jimyung, Kim Yong-Hwa [et al.]. Simple threshold estimation for a 1-bit ADC in a low complex IR-UWB receiver // 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Hannover, Germany, 2008. P. 215–217. DOI: 10.1109/ICUWB.2008.4653389.

28. Norouzi Y., Shahbazi H., Mirzaei S. Performance Analysis of Mono-bit Digital Instantaneous Frequency Measurement (Difm) Device // Mathematical Problems in Engineering. 2017. P. 11. DOI: 10.22060/eej.2017.12155.5050.

29. Mahlooji S., Mohammadi K. Very High Resolution Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 2009 International Conference on Signal Processing Systems. Singapore, 2009. P. 177–181. DOI: 10.1109/ICSPS.2009.43.

30. Helton J., Chen C.-I. H., Lin D. M. [et al.]. FPGA-Based 1.2 GHz Bandwidth Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 9th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2008). San Jose, CA, USA, 2008. P. 568–571. DOI: 10.1109/ISQED.2008.4479798.

31. Krone S., Fettweis G. Capacity of communications channels with 1-bit quantization and oversampling at the receiver // 2012 35th IEEE Sarnoff Symposium. Newark, NJ, USA, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/SARNOF.2012.6222713.

32. Landau L. T. N., Dörpinghaus M., Lamare R. C. [et al.]. Achievable rate with 1-bit quantization and oversampling at the receiver using continuous phase modulation // 2017 IEEE 17th International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB). Salamanca, Spain, 2017. Vol. 17, Issue 10. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICUWB.2017.8250995.

33. Stein M. S. Performance analysis for time-of-arrival estimation with oversampled low-complexity 1-bit a/d conversion // 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans, LA, USA, 2017. P. 4491–4495. DOI: 10.1109/ICASSP.2017.7953006.

34. Mezghani A., Nossek J. A. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output // 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, ON, Canada, 2008. P. 260–264. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4594988.

35. Takuto Ohtaguro, Masato Saito, Takaya Yamazato. Experimental Study on Noise Aided 4PAM Receiver with 1bit ADC // The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE). Japan, Poster Presentation, 2021. URL: <https://ken.ieice.org/ken/paper/20211028BCgX/eng/> (дата обращения: 15.09.2023).

36. Abdelhameed D., Umebayashi K., Atzeni I. [et al.]. Enhanced Signal Detection and Constellation Design for Massive SIMO Communications With 1-Bit ADCs // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 11749–11765. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3242210.

37. Mohammadkarimi M., Ardakani M. Optimal Channel Equalizer for mmWave Massive MIMO Using 1-bit ADCs in Frequency-Selective Channels // IEEE Communications Letters. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 882–885. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2966477.

38. Abdelhameed D., Umebayashi K., Al-Tahmeesshi A. [et al.]. Enhanced Signal Detection for Massive SIMO Communications with 1-Bit ADCs // 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Lucca, Italy, 2021. P. 66–70. DOI: 10.1109/SPAWC51858.2021.9593128.

39. Lin D. M., Liou L. L., Benson S. [et al.]. Mono-bit digital chirp receiver using mono-bit IFM (instantaneous frequency measurement) receiver as a core // Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON). Dayton, OH, USA, 2011. P. 348–351. DOI: 10.1109/NAECON.2011.6183130.

ЛЯШУК Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1635-6235

AuthorID (РИНЦ): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Адрес для переписки: prigor78@mail.ru

ПУЗЫРЁВ Павел Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3588-9740

AuthorID (SCOPUS): 54391518700

ORCID: 0000-0003-0694-9973

ResearcherID: E-8041-2014

Адрес для переписки: p.socrat@rambler.ru

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6758-0406

AuthorID (SCOPUS): 57221599219

ORCID: 0000-0001-5114-2074

ResearcherID: E-8661-2014

Адрес для переписки: zavyalov62@mail.ru

Для цитирования

Ляшук А. Н., Пузырёв П. И., Завьялов С. А. Разработка и исследование структуры цифрового измерителя частоты для системы мгновенного измерения частоты // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 144–152. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-144-152.

Статья поступила в редакцию 17.11.2023 г.

© А. Н. Ляшук, П. И. Пузырёв, С. А. Завьялов

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE STRUCTURE OF A DIGITAL FREQUENCY METER FOR AN INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT SYSTEM

The article proposes a new method for measuring frequency based on a one-bit ADC. In contrast to the known method of measuring frequency using a delay line, the developed structure of a meter that implements the proposed method makes it possible to get rid of delay lines for measuring frequency in a wide frequency range and to sharply reduce the weight and size parameters of the entire meter with an integrated implementation. Unlike other known digital meters, described in sources, the proposed method makes it possible to increase the accuracy of frequency measurements in a wide frequency range.

Keywords: instantaneous frequency measurement, one-bit ADC, delay line, phase shifter, IFM IC.

References

1. Bendat J. S. Principle and Applications of Random Noise Theory. New York: Wiley, 1958. 431 p. (In Engl.).
2. East P. W. Fifty years of instantaneous frequency measurement // IET Radar, Sonar & Navigation. No. 6. P. 112–122. DOI:10.1049/iet-rsn.2011.0177. (In Engl.).
3. Collins J. H., Grant P. M. A review of current and future components for electronic warfare receivers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1981. Vol. 28, no. 3. P. 117–125. DOI: 10.1109/T-SU.1981.31234. (In Engl.).
4. Blerkom R. Van, Freeman D. G., Crutchfield R. C. Frequency Measurement Techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1968. Vol. 17, no. 2. P. 133–145. DOI: 10.1109/TIM.1968.4313684. (In Engl.).
5. Vasilenko V. E., Dikarev B. D., Zikiy A. N. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye priyemnika mgnovennogo izmereniya chastoty [Experimental investigation of the receiver of the momentary frequency measuring] // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2008. No. 3 (80). P. 168–171. EDN: KNOFGV. (In Russ.).
6. Kvachev M. A., Puzyrev P. I., Semenov K. V. Research of Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306185. (In Engl.).
7. Egorov N., Kochemasov V. Mgnovennoye izmereniye chastoty: metody i sredstva [Instantaneous frequency measurement: methods and devices] // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2017. No. 5 (00165). P. 136–141. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141. EDN: YTXAT. (In Russ.).
8. Mazim N. J. N. B., Ain M. F., Hassan S. I. S. ADS simulation of 2 to 5 GHz IFM correlator // 2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics. Johor, Malaysia, 2005. P. 203–206. DOI: 10.1109/APACE.2005.1607807. (In Engl.).
9. Gruchala H., Czyzewski M. The instantaneous frequency measurement receiver in the complex electromagnetic environment // 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No. 04EX824). Warsaw, Poland, 2004. Vol. 1. P. 155–158. DOI: 10.1109/MIKON.2004.1356885. (In Engl.).
10. Lam D., Buckley B. W., Lonappan C. K. [et al.]. Ultra-wideband instantaneous frequency estimation // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015. Vol. 18, no. 2. P. 26–30. DOI: 10.1109/MIM.2015.7066680. (In Engl.).
11. Pandolfi C., Fitini E., Gabrielli G. [et al.]. Comparison of analog IFM and digital frequency measurement receivers for electronic warfare // The 7th European Radar Conference. Paris, France, 2010. P. 232–235. (In Engl.).
12. Thornton M. J. Ultra-broadband frequency discriminator designs for IFM receivers // IEE Colloquium on Multi-Octave Active and Passive Components and Antennas. London, UK, 1989. P. 13/1–13/4. (In Engl.).
13. Goavec A., Vauché R., Gaubert J. [et al.]. Instantaneous frequency measurement for IR-UWB signal in CMOS 130 nm // 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Monte Carlo, Monaco, 2016. P. 157–160. DOI: 10.1109/ICECS.2016.7841156. (In Engl.).
14. Rahimpour H., Masoumi N. Design and Implementation of a High-Sensitivity and Compact-Size IFM Receiver // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, no. 7. P. 2602–2609. DOI: 10.1109/TIM.2018.2866312. (In Engl.).
15. Wu Ruey-Beei, Chao Fang-Lin. Flat spiral delay line design with minimum crosstalk penalty // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B. 1996. Vol. 19, no. 2. P. 397–402. DOI: 10.1109/96.496044. (In Engl.).

16. Rahimpour H., Masoumi N. High-Resolution Frequency Discriminator for Instantaneous Frequency Measurement Subsystem // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 67, no. 10. P. 2373–2381. DOI: 10.1109/TIM.2018.2816804. (In Engl.).
17. Rahimpour H., Masoumi N., Keshani S. [et al.]. A High Frequency Resolution Successive-Band Shifted Filters Architecture for a 15-bit IFM Receiver // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. Vol. 67, no. 5. P. 2028–2035. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2904259. (In Engl.).
18. Rahimpour H., Masoumi N. A 6-bit Instantaneous Frequency Discriminator Based on Band-Stop Resonators // *2018 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Mashhad, Iran, 2018. P. 255–259. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472583. (In Engl.).
19. Fields T. W., Sharpin D. L., Tsui J. B. Digital channelized IFM receiver // *1994 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (Cat. No. 94CH3389-4). San Diego, CA, USA, 1994. P. 87–90. DOI: 10.1109/NTC.1994.316686. (In Engl.).
20. Yingjiao R., Wenfang L. Research on Digital Instantaneous Frequency Measurement Based on Passive Positioning System // *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. Chengdu, China, 2018. P. 1008–1012. DOI: 10.1109/CompComm.2018.8780982. (In Engl.).
21. Su Yu, Jiang Defu. Digital Instantaneous Frequency Measurement of a Real Sinusoid Based on Three Sub-Nyquist Sampling Channels // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. DOI: 10.1155/2020/5089761. (In Engl.).
22. Keshani S., Masoumi N. Improved Frequency Accuracy of IFM Using Minimum Mean Squared Error Algorithm // *Electrical Engineering (ICEE)*. Mashhad, Iran, 2018. P. 260–264. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472591. (In Engl.).
23. Keshani S., Masoumi N., Rahimpour H. [et al.]. Digital Processing for Accurate Frequency Extraction in IFM Receivers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, no. 9. P. 6092–6100. DOI: 10.1109/TIM.2020.2969063. (In Engl.).
24. Hirai A., Tsutsumi K., Tsuru M. [et al.]. A 0.1-to-10 GHz Digital Frequency Discriminator IC with Time to Digital Converter and Adaptive Control of Frequency Division Ratio for Instantaneous Frequency Measurement // *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. Boston, MA, USA, 2019. P. 1287–1290. DOI: 10.1109/MWSYM.2019.8700846. (In Engl.).
25. Wang C., Li Y., Li K. An High-precision FFT Frequency Offset Estimation Algorithm based on Interpolation and Binary Search // *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. Chengdu, China, 2019. P. 437–442. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729465. (In Engl.).
26. Kanai H., Chubachi N., Suzuki H. A method to evaluate accuracy of FFT-based periodicity analysis for short length signal in low SNR // [Proceedings] *ICASSP-92: 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. San Francisco, CA, USA, 1992. Vol. 5. P. 45–48. DOI: 10.1109/ICASSP.1992.226662. (In Engl.).
27. Lee Soon-Woo, Kang Jimyung, Kim Yong-Hwa [et al.]. Simple threshold estimation for a 1-bit ADC in a low complex IR-UWB receiver // *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*. Hannover, Germany, 2008. P. 215–217. DOI: 10.1109/ICUWB.2008.4653389. (In Engl.).
28. Norouzi Y., Shahbazi H., Mirzaei S. Performance Analysis of Mono-bit Digital Instantaneous Frequency Measurement (Difm) Device // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. P. 11. DOI: 10.22060/ej.2017.12155.5050. (In Engl.).
29. Mahlooji S., Mohammadi K. Very High Resolution Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // *2009 International Conference on Signal Processing Systems*. Singapore, 2009. P. 177–181. DOI: 10.1109/ICSPS.2009.43. (In Engl.).
30. Helton J., Chen C. -I. H., Lin D. M. [et al.]. FPGA-Based 1.2 GHz Bandwidth Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // *9th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2008)*. San Jose, CA, USA, 2008. P. 568–571. DOI: 10.1109/ISQED.2008.4479798. (In Engl.).
31. Krone S., Fettweis G. Capacity of communications channels with 1-bit quantization and oversampling at the receiver // *2012 35th IEEE Sarnoff Symposium*. Newark, NJ, USA, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/SARNOF.2012.6222713. (In Engl.).
32. Landau L. T. N., Dörpinghaus M., Lamare R. C. [et al.]. Achievable rate with 1-bit quantization and oversampling at the receiver using continuous phase modulation // *2017 IEEE 17th International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*. Salamanca, Spain, 2017. Vol. 17, Issue 10. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICUWB.2017.8250995. (In Engl.).
33. Stein M. S. Performance analysis for time-of-arrival estimation with oversampled low-complexity 1-bit a/d conversion // *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. New Orleans, LA, USA, 2017. P. 4491–4495. DOI: 10.1109/ICASSP.2017.7953006. (In Engl.).
34. Mezghani A., Nossek J. A. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output // *2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, ON, Canada, 2008*. P. 260–264. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4594988. (In Engl.).
35. Takuto Ohtaguro, Masato Saito, Takaya Yamazato. Experimental Study on Noise Aided 4PAM Receiver with 1bit ADC // *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)*. Japan, Poster Presentation, 2021. URL: <https://ken.ieice.org/ken/paper/20211028BCgX/eng/> (accessed: 15.09.2023). (In Engl.).
36. Abdelhameed D., Umebayashi K., Atzeni I. [et al.]. Enhanced Signal Detection and Constellation Design for Massive SIMO Communications With 1-Bit ADCs // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 11749–11765. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3242210. (In Engl.).
37. Mohammadkarimi M., Ardakani M. Optimal Channel Equalizer for mmWave Massive MIMO Using 1-bit ADCs in Frequency-Selective Channels // *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 882–885. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2966477. (In Engl.).
38. Abdelhameed D., Umebayashi K., Al-Tahmeesschi A. [et al.]. Enhanced Signal Detection for Massive SIMO Communications with 1-Bit ADCs // *2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Lucca, Italy, 2021. P. 66–70. DOI: 10.1109/SPAWC51858.2021.9593128. (In Engl.).
39. Lin D. M., Liou L. L., Benson S. [et al.]. Mono-bit digital chirp receiver using mono-bit IFM (instantaneous frequency measurement) receiver as a core // *Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*. Dayton, OH, USA, 2011. P. 348–351. DOI: 10.1109/NAECON.2011.6183130. (In Engl.).

LYASHUK Aleksey Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 1635-6235

AuthorID (RSCI): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Correspondence address: pribor78@mail.ru

PUZYREV Pavel Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3588-9740

AuthorID (SCOPUS): 54391518700

ORCID: 0000-0003-0694-9973

ResearcherID: E-8041-2014

Адрес для переписки: p.socrat@rambler.ru

ZAVYALOV Sergey Anatolievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6758-0406

AuthorID (SCOPUS): 57221599219

ORCID: 0000-0001-5114-2074

ResearcherID: E-8661-2014

Адрес для переписки: zavyalov62@mail.ru

For citations

Lyashuk A. N., Puzyrev P. I., Zavyalov S. A. Development and research of the structure of a digital frequency meter for an instantaneous frequency measurement system // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 144 – 152. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-144-152.

Received November 17, 2023.

© A. N. Lyashuk, P. I. Puzyrev,

S. A. Zavyalov