

EDN: BPSULE

УДК 621.383

2.2.8

СИСТЕМА МГНОВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТ МНОЖЕСТВА МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДВОЙНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ПАКЕТА ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТ

Л.Д. Ибрагимов, А.А. Иванов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

Аннотация. Широкополосные пакеты дискретных частот (ШПДЧ), генерируемые посредством электрооптической модуляции лазеров непрерывного излучения, обеспечивают высокую мощность отдельных компонент, простое управление шагом пакета, а также меньшую сложность и стоимость по сравнению с генераторами, основанными на других физических принципах. По этим причинам они представляют собой перспективный оптический источник для систем мгновенного измерения частоты (МИЧ) множества микроволновых сигналов (ММС). В этой работе представлена структура с двойным ШПДЧ, генерируемым одним лазером с использованием фазовых электрооптических модуляторов. Применение двойного ШПДЧ повышает универсальность, надежность и стабильность МИЧ ММС без необходимости какой-либо переконфигурации для проведения измерений различных типов сигналов. Кроме того, схема детектирования, основанная на канальном мультиплексировании, улучшает отношение сигнал/шум по сравнению с другими подходами, обеспечивая большую гибкость в конфигурации и высокую скорость получения оценки измеряемых частот.

Ключевые слова: мгновенное измерение частот, микроволновый сигнал, двойной широкополосный пакет дискретных частот, фазовый электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, радиофотоника.

Введение

В ситуациях, когда не требуется сверхширокая полоса традиционных ШПДЧ на основе твердотельных или волоконных лазеров, альтернативой являются их аналоги, генерируемые путем модуляции лазеров непрерывного излучения. Они предлагают значительные преимущества, такие как более высокая мощность спектральных компонент, простое управление шагом между ними и значительно меньшая сложность и стоимость. Кроме того, при применении в МИЧ ММС [1-6] возможность генерации двух ШПДЧ из излучения одного лазера устраняет необходимость синхронизации, а также компенсирует амплитудные и фазовые флуктуации лазера, что позволяет создавать высокостабильные и надежные шкалы для оценки неизвестных частот.

В данной работе представлена универсальная, компактная и надежная система МИЧ ММС (построенная на основе [5]) с двойным ШПДЧ, генерируемых на базе одного лазера и двух фазовых модуляторов. Данная система способна выполнять высокоскоростные непрерывные измерения неизвестных частот ММС, используя только коммерчески доступные компоненты российского производства. В качестве основного отличия от традиционных систем МИЧ ММС на ШПДЧ был добавлен второй пакет и фотоприемник. Использование электрооптических фазовых модуляторов вместо амплитудных позволяет увеличить количество компонент ШПДЧ. Даже несмотря на то, что компоненты ШПДЧ не являются одинаковыми по амплитуде, количество генерируемых компонент можно удвоить при

той же мощности, подаваемой на радиочастотные входы модуляторов. Кроме того, система предлагает гораздо большую гибкость в конфигурации ШПДЧ и скорости вывода данных.

В более ранних работах, основанных на ШПДЧ, генерируемых одним лазером и внешними модуляторами [7-16], предпочтение отдавалось традиционной схеме канализации с равной шириной каналов.

Далее работа построена следующим образом. В первом разделе анализируются общие вопросы построения системы МИЧ ММС на основе двойного ШПДЧ и формирователя двойного ШПДЧ. Во втором разделе акцент ставится на процедуре измерения одной, а в третьем – нескольких неизвестных частот ММС. В заключении обсуждаются результаты проведенных исследований.

1. Принципы построения системы МИЧ ММС на основе двойного ШПДЧ

На рис. 1 показана структурная схема предлагаемой системы МИЧ ММС, построенная на основе [5].

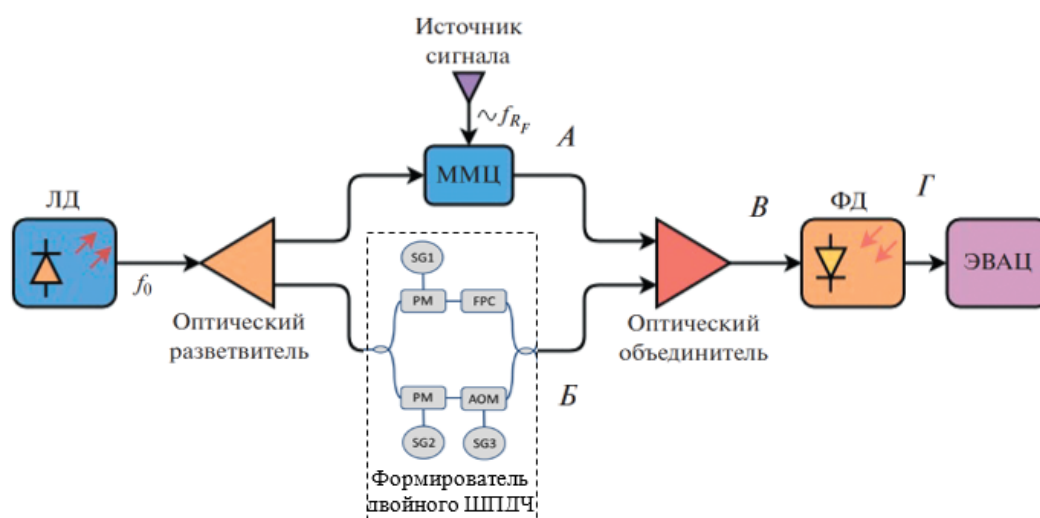


Рис. 1. Структурная схема широкодиапазонной радиофотонной системы МИЧ ММС на основе двойного ШПДЧ с экспоненциально спадающей огибающей:
 ЛД – лазерный диод; ММЦ – амплитудный модулятор Маха-Цендера;
 ФД – фотодетектор; ЭВАЦ – электронный векторный анализатор цепей;
 формирователь двойного ШПДЧ: РМ – фазовый модулятор; АОМ – акустооптический модулятор; SG1-SG3 – радиочастотные генераторы; FPC – поляризационный регулятор

Оптическая несущая с источника лазерного излучения ЛД с частотой f_0 разветвляется на два канала (переноса измеряемой частоты f_{RF} на оптическую несущую и генерирования двойного ШПДЧ) в оптическом разветвителе. В верхнем канале схемы излучение поступает на амплитудный модулятор Маха-Цендера, где происходит перенос измеряемой микроволновой частоты на оптическую несущую. Сама оптическая несущая подавляется. Формируется двухчастотный сигнал на составляющих измеряемой частоты $f_0 \pm f_{RF}$ с разностной частотой между ними равной удвоенной измеряемой частоте (сигнал в точке А).

Проблему с генерацией удвоенной разностной частоты относительно измеряемой можно решить путем применения АФМП по методу Ильина-Морозова, однако это потребует использования дополнительного фазового модулятора в измерительном канале, установленного после АММЦ [17-24].

В нижнем плече сигнал подается на формирователь двойного ШПДЧ для формирования двух многокомпонентных пакетов с экспоненциально спадающей огибающей с переменным шагом полос (сигнал в точке Б). Затем излучения обоих каналов через оптический объединитель (сигнал в точке В) смешиваются на фотодетекторе ФД и поступают на электронный векторный анализатор цепей. Результатом фотосмешения являются две составляющие на частотах биений f_{B1} и f_{B2} между составляющими измеряемой частоты и частотами канала пакета, между которыми они попали (сигнал в точке Г). При этом в сформированном наборе каналов пакета нет ни одного одинакового по ширине, что позволяет повысить степень дискриминации измеряемых частот и исключить коллизии формирования одинаковых частот биений в разных каналах.

Как будет показано далее отношение амплитуд этих составляющих обычно определено амплитудами указанных частотных компонент [5, 19]. По частотам биений и отношению их амплитуд определяется измеряемая мгновенная частота, однако это является предметом отдельных исследований при использовании двойного ШПДЧ.

2. Измерение неизвестной частоты с помощью двойного ШПДЧ с несущей

Оптическая мощность лазера в формирователе двойного ШПДЧ дополнительно разделяется (50:50) на два оптических тракта, где два фазовых модулятора генерируют ШПДЧ с немного разным интервалом. Один из ШПДЧ сдвигается по частоте с помощью акустооптического модулятора (АОМ), и после согласования поляризации в ФРС два оптических ШПДЧ объединяются. Полученный двойной ШПДЧ объединяется с двухполосным сигналом, промодулированным неизвестной частотой, и поступает на фотодетектор (рис. 1). Полученные компоненты ШПДЧ и компоненты модулированного сигнала могут фильтроваться канализационными фильтрами, либо подаваться на ЭВАЦ. Для получения амплитуды и фазы спектральной составляющей одной или нескольких неизвестных частот выполняется многотональное параллельное фазочувствительное детектирование.

Спектры двух ШПДЧ сгенерированы с использованием фазовых модуляторов РМ, возбуждаемых немного разными частотами модуляции f_{PM1} и f_{PM2} (рис. 2,а).

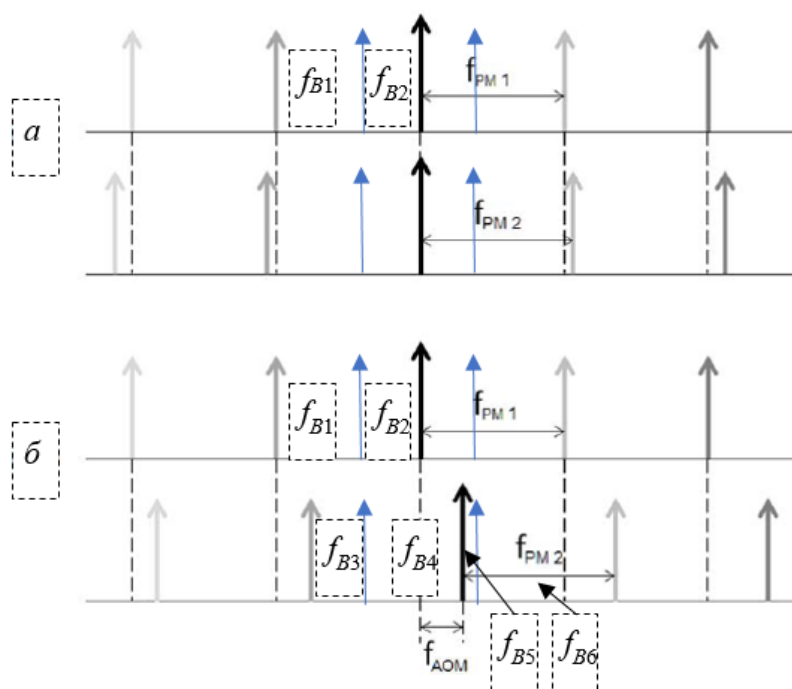


Рис. 2. Генерация двойного ШПДЧ без сдвига (а) и со сдвигом несущей (б)

Если два ШПДЧ (рис. 2, а) гетеродинируются на фотодиоде, частоты результирующих биений представляют собой среднее значение биений нижних и верхних боковых полос. Поэтому невозможно однозначно различить разные компоненты и отношение к каким компонентам имеют частоты биений измеряемого сигнала f_{B1} и f_{B2} .

Когда АОМ включен в оптический тракт второго фазового модулятора, вводится оптический сдвиг частоты, равный $f_{АОМ}$. Это позволяет однозначно отображать каждый компонент двойного ШПДЧ в радиочастотной области. Центральный компонент биений будет иметь частоту, равную $f_{АОМ}$, а остальные биения будут расположены на более высоких и более низких частотах.

Отметим, что теперь нижняя и верхняя полосы измеряемого сигнала будут иметь разные частоты биений с компонентами двойного ШПДЧ, а их число увеличится вдвое (рис. 2, б), при этом $f_{B3} \neq f_{B4} \neq f_{B5} \neq f_{B6}$. Дополнительное преимущество такого подхода определяется тем, что теперь одну неизвестную частоту можно определить по уникальному набору четырех частот биений, что повышает точность измерений.

3. Измерение множества неизвестных частот с помощью двойного ШПДЧ с подавленной несущей

На рис. 3 приведена схема амплитудно-частотного взаимодействия составляющих измеряемой частоты и двойного ШПДЧ с экспоненциально спадающей огибающей и подавленной несущей. Компоненты опорного ШПДЧ помечены крестиком, а сдвинутого с помощью АОМ помечены стрелкой. Для получения ШПДЧ указанной формы на вход РМ необходимо подать радиочастотный сигнал в форме меандра с размахом π [5].

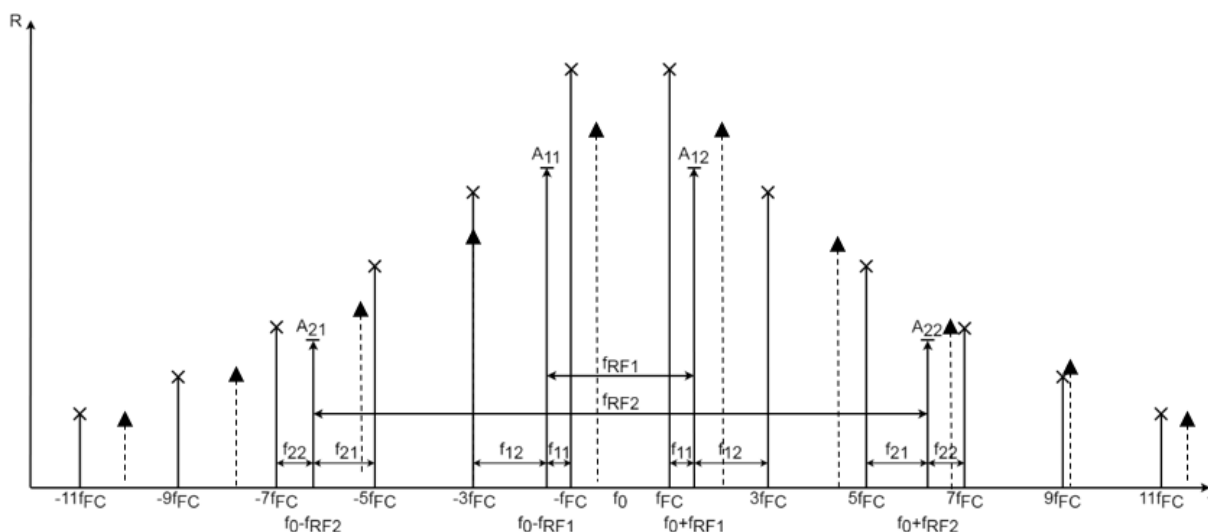


Рис. 3. Амплитудно-частотное взаимодействие составляющих измеряемой частоты и двойного ШПДЧ с экспоненциально спадающей огибающей и подавленной несущей

На фотоприемнике, как на квадратичном элементе, будут формироваться сигналы биений $B_{\pm i}$ составляющих измеряемой частоты $A_{\pm i}$ с оптическими парами компонент ШПДЧ $C_{\pm i}$, между которыми они располагаются. Полоса пропускания фотодетектора выбирается равной ширине одного канала ШПДЧ для фильтрации и дальнейшей обработки биений составляющих измеряемой частоты с близлежащими составляющими компонент ШПДЧ и подавления биений с остальными ее составляющими.

Таким образом на ЭВАЦ могут попадать биения с различных каналов (для примера

на рис. 3 показаны варианты измерения частот (f_{RF1} и f_{RF2}), частота которых будет определяться как частотами сформировавшихся сигналов биений в канале, так и отношением амплитуд этих составляющих, определяемым спектральными характеристиками компонент ШПДЧ. Таким образом, процедура МИЧ ММС сводится к определению номера канала по отношению мощностей сигналов биений и вычислению собственно мгновенной частоты внутри этого канала по значениям частот сигналов биений.

На самом деле, когда система принимает неизвестную радиочастоту для измерения, предполагается, что она попадает между i -й и $(i + 2)$ -й пограничными частотами (компонентами). Соотношение α мощностей между сигналами биений на частотах f_{b1} и f_{b2} можно описать как:

$$\alpha = P_{f_{b1}} / P_{f_{b2}} = G_i^2 / G_{i+2}^2, \quad (1)$$

где G_i – амплитуда составляющей i -й компоненты.

Из уравнения (1) следует, что отношения мощностей этих двух сигналов биений различаются в разных подканалах, поскольку каждому каналу соответствуют разные амплитуды пограничных частот. Во всех каналах $f_{b1} + f_{b2} = 2F_C$, а номер канала распознается по соотношению мощностей α . Неизвестная частота может быть идентифицирована как $F_R = (2i + 1)F_C - f_{b2i}$ в канале $F_C - 3F_C$, где $i = 1$ – номер канала. Если частота F_R попадает в канал $3F_C - 5F_C$, то она определяется как $F_R = (2i + 1)F_C - f_{b2i}$, $i = 2$ – номер канала.

Таким образом отношение амплитуд этих составляющих биений однозначно определено амплитудами указанных частотных составляющих ШПДЧ. По частотам биений и отношению их амплитуд определяется измеряемая мгновенная частота.

Применение двойного ШПДЧ добавляет в канал еще один отличительный признак – дополнительную стабильную и известную по частоте компоненту от сдвинутого в АОМ второго ШПДЧ, которая позволит повысить точность измерения в случае измерения высоких частот, для которых разность амплитуд частот биений может быть сравнима с шумами.

Заключение

Представлена и продемонстрирована компактная и недорогая система МИЧ ММС на основе двойного ШПДЧ, генерируемых одним лазером с использованием только коммерчески доступных компонентов. Эта система использует преимущества более высокой мощности спектральных компонент (что отражается в более высоком отношении сигнал/шум при детектировании) и простой конфигурации ШПДЧ (частота повторения контролируется радиочастотами, используемыми для питания фазовых модуляторов) таких оптических источников. Сложность и стоимость систем значительно ниже, чем у традиционных ШПДЧ на основе твердотельных или волоконных лазеров, поскольку для генерации требуется только лазер непрерывного излучения и электрооптический фазовый модулятор. Система использует многоканальную схему синхронного детектирования, которая улучшает отношение сигнал/шум на 3 дБ, и обеспечивает исключительную гибкость в настройке скорости вывода данных, что позволяет проводить высокоскоростные измерения при разделении по каналам. В ходе исследования были охарактеризованы двойные ШПДЧ с экспоненциально спадающей огибающей, подавленной и неподавленной несущей, что позволило создать конструкцию, способную проводить высокоскоростные измерения при сохранении высокого значения отношения сигнал/шум, особенно в области высоких частот.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список литературы

1. Морозов, О.Г. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники / О.Г. Морозов, Г.И. Ильин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1(20). – С.6–42.
2. Ivanov A. Photonic-assisted receivers for instantaneous microwave frequency measurement based on discriminators of resonance type / A. Ivanov, O. Morozov, A. Sakhabutdinov et al. // Photonics. – 2022. – 9. – P. 754.
3. Мальцев, А.В. Радиофотонные системы измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов на основе широкополосных частотных дискриминаторов – волоконных брэгговских решеток. Обзор / А.В. Мальцев, А.А. Иванов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2024. – Т.4. – № 2. – С. 1–17.
4. Мальцев, А.В. Радиофотонные системы измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов на основе сверх узкополосных частотных дискриминаторов – резонаторы и усилители. Обзор / А.В. Мальцев, А.А. Иванов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2024. – Т.4. – № 2. – С. 1–19.
5. Maltsev A.V. A simple radiophotonic device for instantaneous frequency measurement of multiple microwave signals based on a symmetrical unequal comb generator / A.V. Maltsev, O.G. Morozov, A.A. Ivanov, A.Zh. Sakhabutdinov, A.A. Kuznetsov, A.A. Lustina // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Т. 66. – № 5. – С.737-744.
6. Кузнецов, А.А. Сравнительная оценка способов формирования излучений в виде сверхузкополосного пакета дискретных частот / А.А. Кузнецов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 9. – С. 1–8.
7. Ivanov, A.A. Microwave photonic system for instantaneous frequency measurement based on principles of "frequency–amplitude" conversion in Bragg grating and additional frequency separation / A.A. Ivanov et al. // Proc. Of SPIE. – 2016. – V. 10342. – P. 103421A.
8. Nurgazizov, M.R. Instantaneous frequency measurement of microwave signals in optical range using "frequency–amplitude" conversion in the π -phase-shifted fiber Bragg grating / O.G. Morozov; M.R. Nurgazizov; P.E. Denisenko et al. // Proc. of SPIE. – 2014. – V. 9136. – P. 91361B
9. Morozov, O.G. Instantaneous microwave frequency measurement with monitoring of system temperature / O.G. Morozov, A.A. Talipov, M.R. Nurgazizov et al. // Proc. SPIE. – 2014. – V. 9156. – P. 91560N.
10. Морозов, О.Г. Измерение мгновенной частоты микроволновых сигналов с использованием тандемной амплитудно-фазовой модуляции в оптическом диапазоне / О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. – 2019. – № 5 (157). – С. 16–24
11. Sakhabutdinov, A.J. Multiple frequencies analysis in tasks of FBG based instantaneous frequency measurements / A.J. Sakhabutdinov, O.G. Morozov, A.A. Ivanov, G.A. Morozov, R.Sh. Misbakhov, S.V. Feofilaktov // Proc. SPIE 10774, Optical Technologies in Telecommunications 2017. – 2017. – P. 107740Y.
12. Ivanov, A.A. Radiophotonic method for instantaneous frequency measurement based on principles of frequency–amplitude conversion in fiber Bragg grating and additional frequency separation / A.A. Ivanov, O.G. Morozov, V.A. Andreev, A.A. Kuznetsov and L.M. Faskhutdinov // XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – 2017. – P. 427–430.
13. Ivanov, A.A. Microwave photonic system for instantaneous frequency measurement based on principles of "frequency–amplitude" conversion in Bragg grating and additional frequency separation / A.A. Ivanov et al. // Proc. Of SPIE. – 2016. – V. 10342. – P. 103421A; DOI:10.1117/12.2270839.

14. Morozov, O.G. External amplitude–phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly–harmonic signals: an overview / O.G. Morozov et al. // Proc. of SPIE. – 2016. – V. 9807. – P. 980711.
15. Morozov, O.G. Bragg gratings slopes shape and the measurement error of the microwave signals instantaneous frequency / O.G. Morozov, I.I. Nureev, G.A. Morozov, A.A. Ivanov, A.Z. Sakhabutdinov // Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2021. – P. 1–5.
16. Sakhabutdinov A.Z. Bragg wavelength temperature shift and the measurement error of the microwave signals instantaneous frequency / A.Z. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, G.A. Morozov, A.A. Ivanov, A.A. Tyazhelova // Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2021. – P. 1–5.
17. Ильин, Г.И. К теории квазигармонических колебаний / Г.И. Ильин, А.Г. Ильин, О.Г. Морозов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 3(22). – С. 6–33.
18. Morozov, O.G. Spectrum conversion investigation in lithium niobate Mach–Zehnder modulator / O.G. Morozov, D.L. Aybatov // Proc. SPIE. – 2010. – V. 7523. – P. 75230D.
19. Morozov, O.G. RZ, CS-RZ, and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions / O.G. Morozov // Proc. SPIE Optical Technologies for Telecommunications 2011 (OTT 2011). – 2011. – V. 8410. – P. 84100P.
20. Morozov, O.G. Modulation methods of spectrally pure two-frequency radiation formation for microwaves carrier generation in optical range / O.G. Morozov, G.I. Il'in, G.A. Morozov // Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2017. – P. 1–7.
21. Ильин, Г.И. ЛЧМ–лидар с преобразованием частоты / Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 12. – С.1871–1874.
22. Ильин, Г.И. Исследования ЛЧМ–лидара с преобразованием частоты / Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10. – № 2. – С. 435–440.
23. Ильин, Г.И. Особенности построения электрооптических амплитудно–фазовых формирователей двухчастотного лазерного излучения для дифференциальных ЛЧМ–лидаров / Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11. – № 5. – С. 513–516.
24. Ильин, Г.И. Применение амплитудно–фазового преобразования частоты лазерного излучения для создания специальных схем ЧМ–лидаров / Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т.12. – № 4. – С. 360–363.

INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT SYSTEM OF MULTIPLE MICROWAVE SIGNALS BASED ON A DOUBLE WIDEBAND DISCRETE FREQUENCY PACKET

L.D. Ibragimov, A.A. Ivanov, I.I. Nureev, O.G. Morozov, G.A. Morozov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. Wideband discrete frequency packets (WDFP), generated by electro-optical modulation of continuous-wave lasers, provide high power for individual components, simple control of the packet pitch, and reduced complexity and cost compared to generators based on other physical principles. For

these reasons, they represent a promising optical source for instantaneous frequency measurement (IFM) systems of multiple microwave signals (MSM). This paper presents a dual-WDFP design generated by a single laser using phase electro-optical modulators. The use of dual-WDFP improves the versatility, reliability, and stability of IFM systems without requiring any reconfiguration for measuring different signal types. Furthermore, a channel-multiplexing-based detection scheme improves the signal-to-noise ratio compared to other approaches, providing greater configuration flexibility and high-speed retrieval of measured frequencies.

Keywords: instantaneous frequency measurement, microwave signal, dual-wideband discrete frequency packet, phase electro-optical modulator, acousto-optic modulator, microwave photonics.

Статья представлена в редакцию 28 марта 2026 г.