

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТ МНОЖЕСТВА ЛОКАЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ РАДИОФОТОННЫМ МЕТОДОМ

Г.С. Потанов, И.И. Нуреев

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

Аннотация. В данной статье представлен радиотонный метод для мгновенного измерения частот нескольких сигналов радиолокации с использованием двухканальной системы, использующей оптическую частотную гребенку.

Ключевые слова: радиотонные измерения, мгновенное измерение частоты, частотная гребенка, фотодетектирование, радиолокационные сигналы.

Введение

Измерение частот множества радиолокационных сигналов в реальном времени является актуальной задачей в современных системах радиомониторинга и радиоразведки. Традиционные электронные методы обладают ограниченной полосой пропускания и быстродействием. Радиотонные методы предлагают решение, основанное на обработке сигналов в оптической области, что позволяет достичь высокой скорости измерений и широкой полосы частот.

Материалы и методы

Для измерения частот множества локационных радиосигналов [1] оптическая несущая с источника лазерного излучения с частотой f_0 разветвляется на два канала (переноса измеряемых частот f_{RFN} на оптическую несущую и генерирования частотной гребенки с шагом f_{FC}) в оптическом разветвителе. В верхнем канале схемы излучение поступает на амплитудный модулятор Маха-Цендера, где происходит перенос измеряемых микроволновых частот на оптическую несущую. Сама оптическая несущая подавляется. Формируется N двухчастотных сигналов на составляющих измеряемых частот $f_0 \pm f_{RFN}$ с разностной частотой между ними равной удвоенной измеряемой частоте $2f_{RFN}$.

Проблему с генерацией удвоенной разностной частоты относительно измеряемых можно решить путем применения амплитудно-фазового преобразования несущей по методу Ильина-Морозова [2-4], однако это потребует использования дополнительного фазового модулятора в измерительном канале. Поэтому в нижнем плече сигнал подается на фазовый модулятор, включенный для формирования многокомпонентной частотной гребенки с экспоненциально спадающей огибающей с шагом полос $f_{FC} = 2$ ГГц.

Затем излучения обоих каналов через оптический объединитель смешиваются на фотодетекторе и поступают на электронный векторный анализатор цепей (ЭВАЦ). Результатом фотосмешения являются две составляющие на частотах биений f_{B1N} и f_{B2N} между составляющими измеряемых частот и частотами гребенки, между которыми они попали.

Как будет показано далее отношение амплитуд этих составляющих однозначно определено амплитудами указанных частотных составляющих гребенки. По частотам биений и отношению их амплитуд определяется измеряемая мгновенная частота.

Результаты исследования

На рисунке 1 приведена схема амплитудно-частотного взаимодействия составляющих измеряемых частот и частотной гребенки с экспоненциально спадающей огибающей.

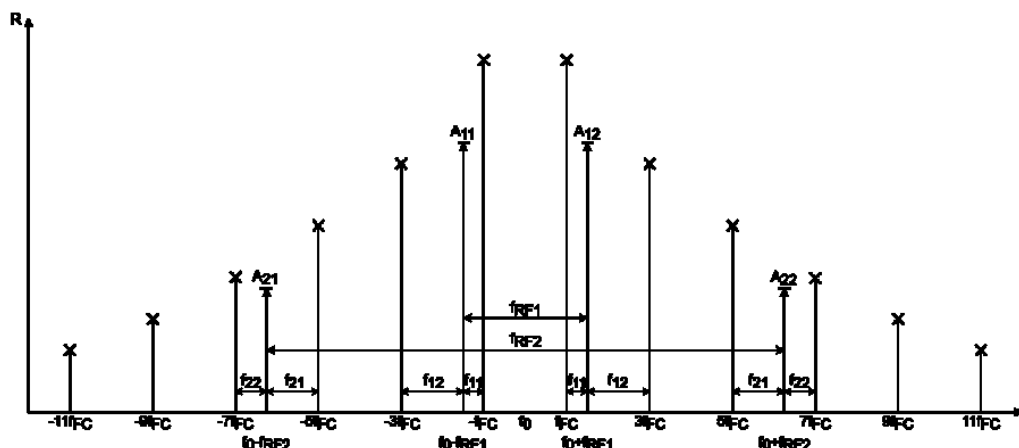


Рис. 1. Амплитудно-частотное взаимодействие составляющих измеряемых частот и частотной гребенки с экспоненциально спадающей огибающей

На фотоприемнике, как на квадратичном элементе, будут формироваться сигналы биений $B_{\pm j}$ составляющих измеряемых частот $A_{\pm 1N}$ с оптическими парами составляющих частотной гребенки $C_{\pm i}$, между которыми они располагаются. Полоса пропускания фотодетектора выбирается равной ширине одного канала частотной гребенки для фильтрации и дальнейшей обработки биений составляющих измеряемой частоты с близлежащими составляющими частотной гребенки и подавления биений с остальными её составляющими.

Таким образом на ЭВАЦ могут попадать биения с различных каналов (для примера на рис. 1 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 частотной гребенки. Таким образом, процедура измерения частот множества радиолокационных сигналов сводится к определению номера канала по отношению мощностей сигналов биений и вычислению собственно мгновенной частоты внутри этого канала по значениям частот сигналов биений.

Для нулевого канала $\pm f_C$ должна быть рассмотрена особая ситуация. Спектр содержит частоту биений F_R с левой пограничной частотой $-F_C$ и правой пограничной частотой F_C . Между ними расположена искомая частота биений $2F_R$. Для неё характерна осциллограмма с коэффициентом амплитудной модуляции, равным 1.

Заключение

Разработан радиофотонный метод измерения частот множества локационных радиосигналов. Метод основан на двухканальной схеме с использованием частотной гребенки и позволяет определять мгновенные частоты сигналов по отношению амплитуд и частотам биений. Предложенный подход обеспечивает высокую скорость измерений и широкую полосу частот, что делает его перспективным для применения в системах радиомониторинга и радиоразведки. Вопрос попадания нескольких частот в один и тот же канал частотной гребенки будет рассмотрен в дальнейших работах.

Список литературы

1. Sakhabutdinov, A.Z. Multiple frequencies analysis in FBG based instantaneous frequency measurements / A.Z. Sakhabutdinov, O.G. Morozov, A.A. Ivanov [et al.] // IEEE Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2018. – P. 8350635.
2. Khabibullin, R.A. Methods of spectrally pure two-frequency radiation forming for terahertz carriers generation in optical range / R.A. Khabibullin, O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov et al.// IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – 2017. – P. 7997568.
3. Ал-Муфти, А.М. Широкополосные и сверхузкополосные пакеты дискретных частот для решения задач спектральной настройки восходящих каналов волоконно-оптических транспортных доменов сетей доступа мобильной связи 5G+ / А.М. Ал-Муфти, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2025. – Т. 5. – № 1. – С. 64-89.
4. Талипов, А.А. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / А.А. Талипов, О.Г. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 3-12.

MEASURING THE FREQUENCIES OF A SET OF RADIO LOCATION SIGNALS BY THE MICROWAVE PHOTONICS METHOD

G.S. Potapov, I.I. Nureyev

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

Abstract. This paper presents a microwave photonics method for instantaneously measuring the frequencies of multiple radio location signals using a two-channel system that employs an optical frequency comb.

Keywords: microwave photonic measurements, instantaneous frequency measurement, frequency comb, photodetection, radar signals.

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025 г.