

Научная статья

УДК 621.383

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.65>

Программно-аппаратный анализатор спектра для радиопотонных устройств измерения доплеровского сдвига частоты и его знака

О. Г. Морозов^{1✉}, Г. А. Морозов¹, Г. И. Ильин¹,
И. И. Нуреев¹, А. Ж. Сахабутдинов¹, И. Н. Ростокин², А. В. Мальцев¹,
А. А. Иванов¹, А. А. Лустина¹, Е. П. Денисенко¹, П. Е. Денисенко¹, В. Д. Андреев¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10,
OGMorozov@kai.ru✉

²Муромский институт имени В.К. Зворыкина, филиал Владимирского государственного университета
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Российская Федерация, 602264, Муром, ул. Орловская, .23

Аннотация. В статье рассмотрены типовые задачи определения доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) и его знака в непрерывных и импульсных РЛС, использующих радиопотонные технологии в режимах одно- и многоцелевого сопровождения. Предложена структура программно-аппаратного анализатора спектра и варианты его математического обеспечения для решения указанных задач. Анализатор функционально универсален, однако, его основное целевое назначение – решение задач определения величины и знака ДСЧ при использовании в РЛС радиопотонного устройства на основе тандемных однопортовых амплитудного и фазового модуляторов (ТАФМ). Для режима сопровождения непрерывной РЛС одной цели предложен метод аппаратного линейного фильтра с наклонной АЧХ и анализом попарных частот биений, а для многоцелевого сопровождения он дополнен БПФ с дальнейшим анализом всех полученных компонент с помощью сканирования программным сверхзаклопосным фильтром. Абсолютная погрешность определения ДСЧ по частоте информационных сигналов зависит от полосы пропускания программного сверхзаклопосного фильтра (единицы Гц). Относительная погрешность определения амплитуд информационных сигналов не превышает $\pm 10^{-3}$ почти во всём диапазоне амплитуд аппаратного линейного фильтра. Отношение D полученных амплитуд для пары поставленных в соответствие информационных частот ДСЧ определённой цели позволяет определить его знак: при $D < 1$ цель удаляется, при $D > 1$ цель приближается. Методом, аналогичным методу для многоцелевого сопровождения непрерывной РЛС, могут быть решены типовые задачи определения ДСЧ и его знака в импульсных РЛС.

Ключевые слова: радиопотоника; радиолокация; непрерывные и импульсные РЛС; одно- и многоцелевой режим сопровождения; доплеровский сдвиг частоты; типовые задачи определения величины доплеровского сдвига частоты и его знака; программно-аппаратный анализатор спектра

Финансирование: Исследование выполнено частично при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания КНИТУ-КАИ № 075-03-2020-051, фзу-2020-0020, программа «Фократ», частично при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы «Приоритет 2030», частично при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378.

© Морозов О. Г., Морозов Г. А., Ильин Г. И., 2021.

Для цитирования: Морозов О. Г., Морозов Г. А., Ильин Г. И., Нуреев И. И., Сахабутдинов А. Ж., Ростокин И. Н., Мальцев А.В., Иванов А. А., Лустина А. А., Денисенко Е. П., Денисенко П. Е., Андреев В. Д. Программно-аппаратный анализатор спектра для радиопотонных устройств измерения доплеровского сдвига частоты и его знака // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 65-80. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.65>

Введение. Интерес к использованию радиофотонных технологий (РФТ) обработки радиолокационных сигналов растёт постоянно. Это обусловлено широкой полосой пропускания, высокой скоростью измерения, низкими частотно-зависимыми потерями, устойчивостью к электромагнитным помехам, характерными для РФТ [1–3]. Среди различных параметров радиолокационных сигналов доплеровский сдвиг частоты – один из наиболее часто используемых, который необходим как для дальномерных, так и для доплеровских радиолокационных систем военного и гражданского применения. ДСЧ – это разность между частотой отражённого от цели сигнала и локационной частотой передатчика РЛС. Он используется для определения скорости и направления движения цели.

Измерение ДСЧ с помощью РФТ реализуется с помощью широкого спектра устройств, как правило, путём определения частоты биений между локационным и отражённым от цели сигналами.

Большинство из них имеет сложную структуру, которая включает в себя несколько лазерных источников, оптических модуляторов и фотодетекторов [4–6]. Более того, в ряде из них применяются электронные компоненты, ограничивающие рабочую частотную полосу устройств. Многие известные устройства для измерения направления движения требуют дополнительного оснащения, например, осциллографами, что дополнительно повышает трудоёмкость измерений. Дополнительной проблемой является тот факт, что большинство из них предназначено для работы в составе непрерывных РЛС. Однако многие РЛС используют для локации импульсные сигналы. Следует отметить, что для указанных выше систем не рассматривается и вариант измерения ДСЧ от множества целей.

Более простые устройства являются и более универсальными. Они, как правило, используют один лазер, один модулятор и один фотоприёмник. Основным отличием каждого из них является метод введения в смесь сигналов реперного для определения

знака движения цели [7–10]. Это может быть выполнено с помощью микроволнового смещения локационного сигнала (сотни МГц – десятки ГГц) и реперного, который составляет, как правило, 1–2 МГц и определяется типовым значением ДСЧ в РЛС. Такие методы включают в себя использование сдвига частоты с помощью акустооптического модулятора, пилообразную фазовую модуляции плеча одного из двух модуляторов Маха–Цендера (ММЦ) в параллельном двухпортовом модуляторе, сплиттирования локационной частоты в тандемном амплитудно-фазовом модуляторе (ТАФМ) [11]. Данные устройства не требуют дополнительных электронных компонент и генераторов микроволновых опорных сигналов, осциллографов. Для радиофотонных устройств [7–10] основным недостатком является наличие в выходном спектре паразитных гармоник, вызванное нелинейностью модуляционных характеристик и конечностью крутизны используемых полосовых оптических фильтров, что показано нами в [11].

Технические методы совершенствования устройств для измерения параметров ДСЧ не всегда оправдывают затраченные на них средства, и уровень составляющих высших порядков или отфильтрованных боковых полос остаётся достаточным для внесения существенных погрешностей в измерения частоты. Таким образом, целью работы является создание универсальных алгоритмов и математических моделей решения типовых задач определения величины и знака ДСЧ в радиофотонных устройствах, независимо от их структуры, с возможностью компенсации погрешностей измерений числительными методами.

Для достижения цели в первом разделе статьи рассмотрены типовые спектральные ситуации, как правило, трёхчастотные, которые возникают в однокомпонентных устройствах, и дана постановка задач определения скорости и направления движения цели в каждом из них. Во втором разделе рассмотрена универсальная мате-

математическая модель для их решения. В третьем разделе обсуждены спектральные ситуации, как правило, многочастотные, возникающие при отражении сигналов непрерывных РЛС от множества целей и в вариантах измерения ДСЧ при импульсной локализации. В четвертом разделе рассмотрена универсальная математическая модель для их решения и дана оценка погрешностей измерения. В заключении обсуждены полученные результаты и определены направления дальнейших исследований.

1. Типовые трёхчастотные задачи определения величины и знака ДСЧ в радиофотонных устройствах

В [7] предложен и продемонстрирован новый подход для одновременного определения значения и направления ДСЧ с использованием устройства на основе двухпортового модулятора Маха–Цендера (ДПММЦ). В предлагаемой схеме вводится реперный сигнал на частоте f_R для определения направления движения цели. Реперный и локационный сигналы подаются на первый радиочастотный порт ДПММЦ, а отражённый от цели сигнал – на второй. Затем модулированные оптические сигналы поступают на низкочастотный фотоприёмник. Частота биений между локационным и отражённым сигналами позволяет определить ДСЧ $f_{DSF} = |f_T - f_E|$. Тем временем, направление ДСЧ можно определить, сравнив частоту биений между реперным и локационным сигналами с частотой биений между реперным и отражённым сиг-

налами. Следовательно, значение и направление ДСЧ могут быть идентифицированы одновременно.

На рис. 1 представлены два варианта расположения частот на выходе фотоприёмника для удаляющейся и приближающейся целей.

Постановка задачи заключается в том, чтобы, не используя дорогого электронного векторного анализатора спектра, определить значение f_{DSF} и скорость цели, а также взаимное расположение частот $f_T - f_R$ и $f_E - f_R$, и, тем самым, направление движения цели. При этом частоты f_T и f_R известны.

В [10] локационный и отражённый сигналы подводятся к двум портам ДПММЦ. Низкочастотный пилообразный реперный сигнал f_S подаётся на порт смещения постоянного тока модулятора для преобразования частоты несущей и боковых полос, генерируемых локационным сигналом. Частота выходного электрического сигнала фотоприёмника, генерируемая биениями частотно-сдвинутых полос локационного сигнала и боковыми полосами отражённого сигнала, представляет информацию как о значении, так и о знаке ДСЧ. При этом информацию необходимо извлекать с учётом не идеальности полосовых фильтров подавления несущей частоты боковых полос высокого порядка.

На рис. 2 представлены два варианта расположения частот на выходе фотоприёмника для удаляющейся и приближающейся целей.

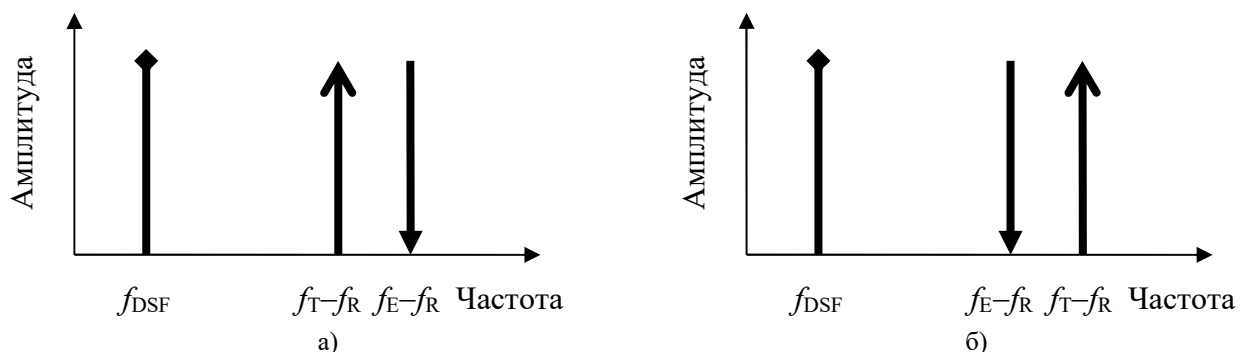


Рис. 1. Ситуационное расположение частот на выходе фотоприёмника для удаляющейся (а) и приближающейся (б) целей: f_T, f_E, f_R – локационная, отражённая и реперная частоты соответственно
 Fig. 1. Situational arrangement of frequencies at the output of the photodetector for receding (a) and approaching (b) targets: f_T, f_E, f_R – radar, reflected and reference frequencies, respectively

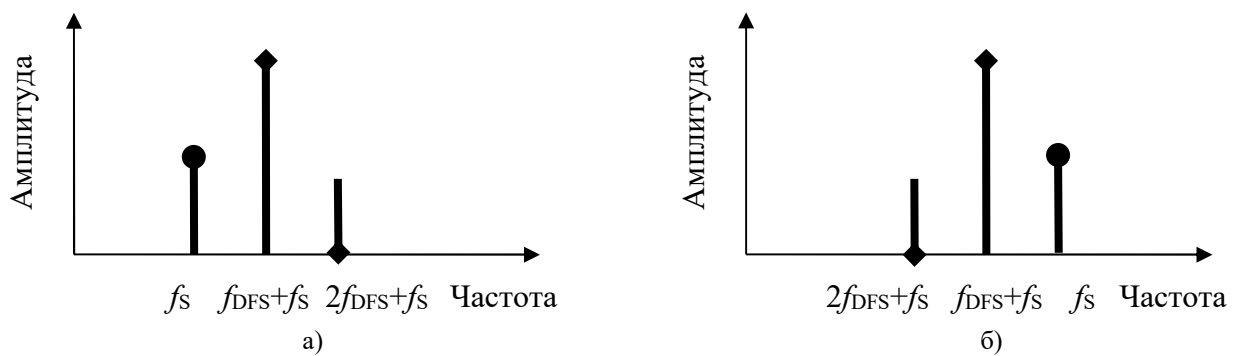


Рис. 2. Ситуационное расположение частот на выходе фотоприёмника для удаляющейся (а) и приближающейся (б) целей: f_T, f_E, f_S – локационная, отражённая и пилообразная частоты соответственно
 Fig. 2. Situational arrangement of frequencies at the output of the photodetector for the receding (a) and approaching (b) targets: f_T, f_E, f_S – radar, reflected and ramp frequencies, respectively

Постановка задачи заключается в том, чтобы, не используя дорогого электронного анализатора спектра, определить взаимное расположение частот $f_{DFS}+f_S=f_E-f_T+f_S$ и $2f_{DFS}+f_S=2f_E-2f_T+f_S$, и, тем самым, направление и скорость движения цели. При этом частоты f_T и f_S известны.

В [11] представлен измеритель ДСЧ, который имеет ту же структуру, что и последовательное радиопотонное звено с фильтрацией и состоит из лазера, блока электрооптических модуляторов, ВБР-фильтра и фотоприёмника. Блок электрооптических модуляторов в отличие от известных решений на ДПММЦ построен на двух субблоках, состоящих из тандемных амплитудно-фазовых модуляторов [12–14]. Общая структура включения субблоков ТАФМ параллельно-последовательная. С

антенны на ТАФМ₁, образующей измерительный канал, поступает отражённый от объекта микроволновый сигнал f_E . ТАФМ₂ и ТАФМ₃, включённые последовательно, образуют опорный канал, подключённый параллельно к измерительному. На ТАФМ₂ поступает опорный сигнал от передатчика локатора на микроволновой частоте f_T , после чего двухчастотное излучение, разнесённое на локационную частоту, подаётся на ТАФМ₃, который формирует из каждой компоненты двухчастотного излучения сплитированные две компоненты с разностной реперной частотой f_D , равной максимально возможному ДИЧ.

На рис. 3 представлены два варианта расположения частот на выходе фотоприёмника, для удаляющейся и приближающейся целей.

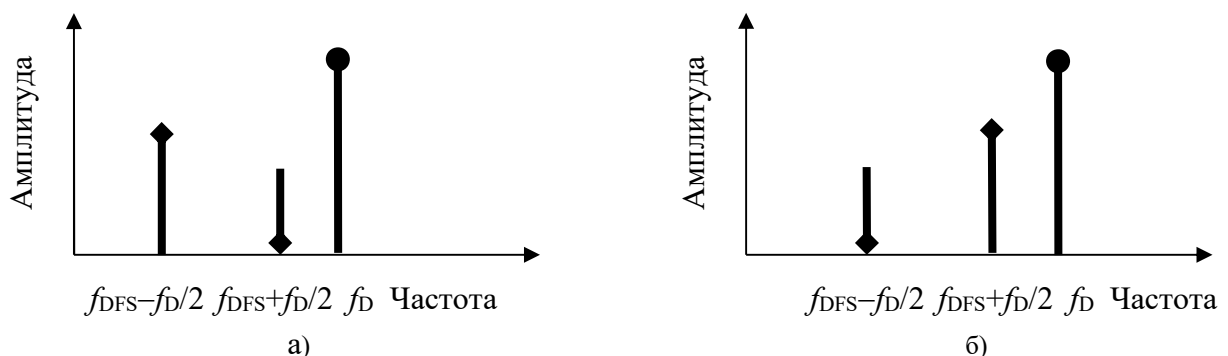


Рис. 3. Ситуационное расположение частот на выходе фотоприёмника для удаляющейся (а) и приближающейся (б) целей: f_T, f_E, f_D – локационная, отражённая и сплит частоты соответственно
 Fig. 3. Situational arrangement of frequencies at the output of the photodetector for the receding (a) and approaching (b) targets f_T, f_E, f_D : – location, reflected and split frequencies, respectively

Постановка задачи заключается в том, чтобы, не используя дорогого электронного анализатора спектра, определить соотношение амплитуд сигналов на частотах $f_{DFS}-f_D/2 = f_E-f_T-f_D/2$ и $f_{DFS}+f_D/2 = f_E-f_T+f_D/2$, и, тем самым, скорость и направление движения цели. При этом частоты f_T и f_D известны.

Рассмотрим общий подход к решению поставленных задач. Общее в условии всех задач – это наличие двух известных частот, локационной и реперной, с известной амплитудой после преобразования в радиофотонных устройствах. В первой задаче частота ДСЧ представлена непосредственной составляющей. Во второй и третьей задачах частота ДСЧ входит как слагаемое в измеряемые компоненты, кроме того, во второй задаче меняется взаимное положение компонент, а в третьей – их амплитуды.

2. Решение трёхчастотных задач определения величины и знака ДСЧ в радиофотонных устройствах

Анализ отдельных поставленных задач позволил предположить возможность их решения на основе определения коэффициента модуляции огибающей биений различных пар частот на выходе фотоприёмника (ФП). Однако для определения знака ДСЧ необходимо применять и фазовый анализ огибающей биений, что применялось нами для решения задач двухча-

стотного зондирования избирательных систем [15], и рассматривается как недостаток. Для универсального решения трёхчастотных задач был использован принцип обработки информации, разработанный нами для опроса одной трёхкомпонентной адресной волоконной брэгговской структуры-сенсора [16, 17] и измерений мгновенной частоты микроволнового сигнала с помощью РФТ [13]. Для этого была разработана структурная схема программно-аппаратного анализатора трёхчастотного радиосигнала на выходе ФП 1 (рис. 4).

Анализатор состоит из делителя – 2, верхнего измерительного плеча схемы, содержащего высокочастотный фильтр (ВДФ) с линейным склоном – 3 и первый нелинейный детектор – 4, и нижнего опорного плеча, нагруженного на второй идентичный нелинейный детектор – 6. Модули АЦП, кроме выполнения своих прямых функций, представляют собой интерфейс для связи с микроконтроллером определения ДСЧ и его знака. На включениях *a* и *b* условно показаны спектральные ситуации в измерительном и опорном каналах. На рис. 5 представлено расположение искомых частот на выходе склона ВДФ, за f_0, f_1, f_2 обозначены комбинации информационных, реперных частот и их комбинаций в соответствии с постановкой каждой из задач.

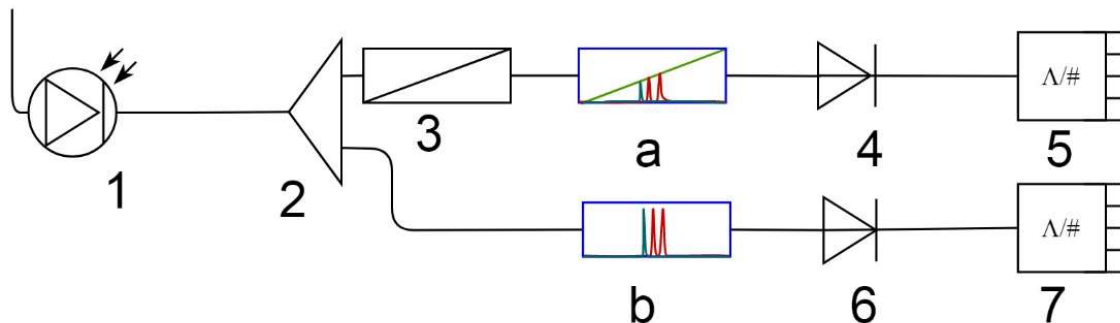


Рис. 4. Схема электронного анализатора спектра для обработки сигнала на выходе фотоприёмника
Fig. 4. Scheme of an electronic spectrum analyzer for signal processing at the output of a photodetector

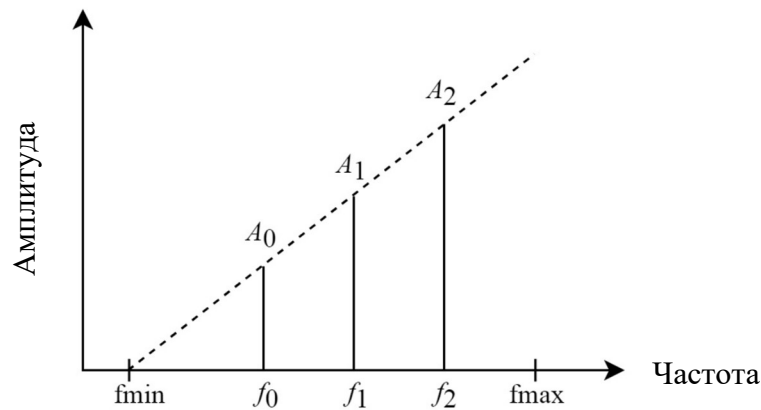


Рис. 5. Ситуационное расположение частот на выходе ВДФ
Fig. 5. Situational arrangement of frequencies at the output of a high Q -factor filter (HQF)

Приём выходного сигнала на нелинейном детекторе в измерительном и опорном плечах анализатора позволяет соответственно определить амплитуды биений указанных частот, исходя из соотношений:

$$\begin{cases} 2A'_0A'_1 = D'_{01} \\ 2A'_1A'_2 = D'_{12} \\ 2A'_0A'_2 = D'_{02} \end{cases} \text{ и } \begin{cases} 2A_0A_1 = D_{01} \\ 2A_1A_2 = D_{12} \\ 2A_0A_2 = D_{02} \end{cases}. \quad (1)$$

Из (1) можно определить амплитуды частот в верхнем и нижнем плечах измерительной схемы, соответственно:

$$\begin{cases} A'_0 = \sqrt{\frac{D'_{01}D'_{02}}{2D'_{12}}} \\ A'_1 = \sqrt{\frac{D'_{12}D'_{01}}{2D'_{02}}} \\ A'_2 = \sqrt{\frac{D'_{02}D'_{12}}{2D'_{01}}} \end{cases} \text{ и } \begin{cases} A_0 = \sqrt{\frac{D_{01}D_{02}}{2D_{12}}} \\ A_1 = \sqrt{\frac{D_{12}D_{01}}{2D_{02}}} \\ A_2 = \sqrt{\frac{D_{02}D_{12}}{2D_{01}}} \end{cases}. \quad (2)$$

ВДФ с линейными склонами описывается собственной амплитудно-частотной характеристикой, характеризующей подавление амплитуды сигнала до нуля при $f=f_{\min}$ и полное пропускание сигнала при $f=f_{\max}$ в диапазоне частот $[f_{\min}, f_{\max}]$:

$$L(f) = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}. \quad (3)$$

Это позволяет определить все частоты f_i , зная коэффициенты изменения амплитуд до и после фильтра. Например, для частоты f_i известно, что прохождение частоты f_i с амплитудой A_i через фильтр (3) изменило её амплитуду до A'_i , что позволяет записать соотношение для определения величины f_i относительно фильтра:

$$A'_i = A_i \frac{f_i - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}. \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет найти величины f_0, f_1 и f_2 относительно параметров высокочастотного фильтра с линейными склонами:

$$\begin{aligned} f_2 &= \sqrt{\frac{D'_{02}D'_{12}D_{01}}{D_{02}D_{12}D'_{01}}} (f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min}, \\ f_0 &= \sqrt{\frac{D'_{01}D'_{02}D_{12}}{D_{01}D_{02}D'_{12}}} (f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min}, \\ f_1 &= \sqrt{\frac{D'_{12}D'_{01}D_{02}}{D_{12}D_{01}D'_{02}}} (f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min}. \end{aligned} \quad (5)$$

После чего возможно выделить локационную, отражённую и реперные частоты по алгоритмам программного обеспечения микроконтроллера, характерные для каждой из постановок задач, при этом следует учитывать, что все реперные частоты соответствуют $f_{\max}$ и составляют 1–2 МГц в зависимости от диапазона скоростей летательных аппаратов, сопровождаемых РЛС и использующих РФТ трёх типов [7, 10, 11].

3. Типовые многочастотные задачи определения величины и знака ДСЧ в радиопотонных устройствах

Все рассмотренные в разд. 1 системы измерения ДСЧ на основе ДПММЦ и ТАФМ могут использоваться в многоцелевых непрерывных РЛС и РЛС импульсного типа. Если для ДПММЦ эти случаи рассмотрены в [10], то для ТАФМ анализ таких задач будет приведён впервые.

В первом случае (многоцелевое сопровождение РЛС непрерывного типа) формируется многочастотная задача для n -троек частот, соответствующих n целям и состоящих из двух информационных частот и частоты сплиттирования f_D . При этом частота сплиттирования f_D является общей для всех троек. На рис. 6 показан случай спектра для четырёх движущихся целей при их одновременном сопровождении непрерывной РЛС.

Отметим, что первые две цели с f_{DFS1} и f_{DFS2} движутся разнонаправленно от и к РЛС с «большой» скоростью, а вторые две

цели с f_{DFS3} и f_{DFS4} движутся разнонаправленно от и к РЛС с «малой» скоростью. Амплитуды сигналов, представленных на рис. 6, показаны, как и скорости, условно, и в принципе не несут информации о ДСЧ. Важным является лишь соотношение амплитуд в каждой паре сигналов для каждой f_{DFSi} , где $i=1\dots 4$, что и является основным фактором для определения скорости движения цели и её направления в проекции на ось излучения РЛС.

Во втором случае (сопровождение цели РЛС импульсного типа) локационный и отражённые сигналы представляют собой бесконечную в пределе серию импульсов. Их спектры состоят из дискретных спектральных линий с частотным интервалом между ними, равным частоте следования импульсов f_R .

На рис. 7 показан выходной спектр радиопотонного устройства на базе ТАФМ [11], используемого в импульсной РЛС, поступающий для обработки на программно-аппаратный анализатор (рис. 4).

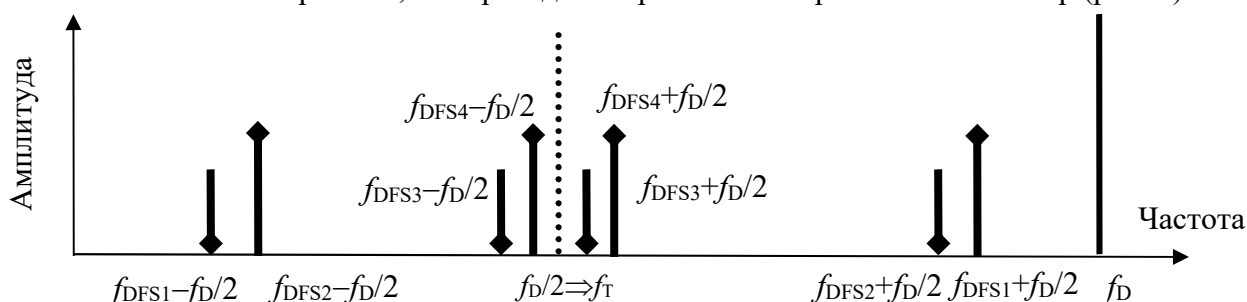


Рис. 6. Выходной оптический спектр предлагаемого радиопотонного устройства на базе ТАФМ [11], используемого при многоцелевом сопровождении непрерывной РЛС

Fig. 6. Output optical spectrum of the proposed radiophotonic device based on a tandem amplitude-phase modulator (TAPM) [11] used in multiple-target tracking by continuous wave radar

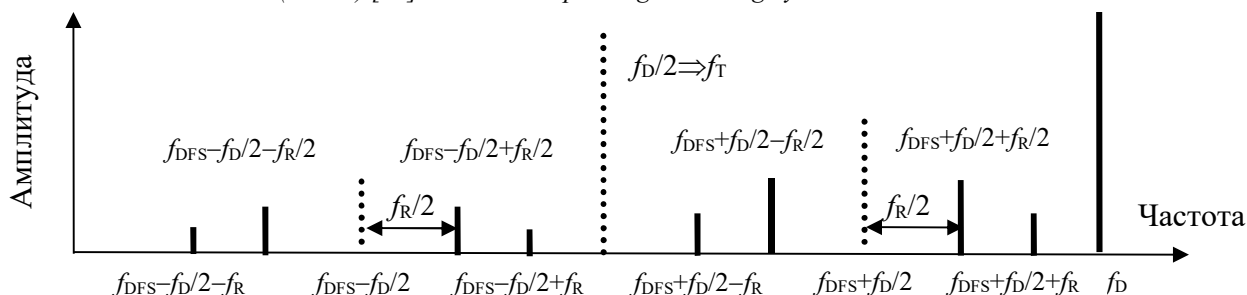


Рис. 7. Выходной спектр предлагаемого радиопотонного устройства на базе ТАФМ [11], используемого в импульсной РЛС при сопровождении удаляющейся цели

Fig. 7. Output spectrum of the proposed radiophotonic device based on TAPM [11], used in tracking a receding target by a pulse radar

Обратим внимание, что для простоты на рис. 7 мы показали только пять спектральных линий импульсного спектра каждой информационной составляющей $f_{DFS} \pm f_D/2$. Биение спектральных линий на нелинейном приёмнике приведёт к тому, что будут сгенерированы выходные сигналы на частотах $\pm n \cdot f_R/2$, которые состоят из n -составляющих также несущих информацию о f_{DFS} .

Обратим также внимание на то, что предлагаемая система измерения ДСЧ не требует синхронизации по времени, потому что включает только измерение частоты. Как и в системе с непрерывной РЛС, величину и знак ДСЧ можно получить из соотношения амплитуд сигнальных частот. Оценки также показывают, что в идеальной ситуации, когда цель одна, информационные пики соответствуют рис. 3, а и являются набором частот, которые присутствуют в диапазоне частот $\pm f_D/2 \pm f_R/2 = \pm 1 \pm (1/n)$ МГц при $f_D = 2$ МГц.

4. Решение многочастотных задач определения величины и знака ДСЧ в радиофотонных устройствах

Для универсального решения многочастотных задач был использован принцип обработки информации, разработанный нами для опроса множества трёхкомпонентных адресных волоконных брэгговских структур [16] и измерения мгновенных частот множества микроволновых сигналов с помощью РФТ [18].

Рассмотрение будем вести для случая многоцелевого сопровождения непрерывной РЛС, представленного на рис. 8 для i -й решётки. Подход с использованием БПФ и сканированием многочастотного спектра сверхузкополосным программным фильтром позволяет определить все спектральные частоты и их амплитуды. Известными величинами являются частота сплиттирования $f_D = f_{2,i} = f_2$, а также симметричный характер расположения неизвестных информационных частот $f_{0,i}$ и $f_{1,i}$ относительно $f_D/2$. Кроме того, неизвестными величинами являются амплитуды $A_{0,i}$ и $A_{1,i}$ ($2N$ величин) и положение информационных частот относительно частоты сплиттирования $\Omega_{0,i}$, $\Omega_{1,i}$ ($2N$ величин).

Добавим $2N+1$ требование, что точки (f_2, A_2) , $(2\pi f_D - \Omega_{1,i}, A_{1,i})$, $(2\pi f_D - \Omega_{2,i}, A_{0,i})$ связаны, поскольку они все проходят через один и тот же фильтр с известной наклонной амплитудно-частотной характеристикой (3) и (4), а также равенство $\Omega_{2,i} = \Omega_{0,i} - \Omega_{1,i}$ ($2N$ величин).

Исключив из рассмотрения первичные уравнения, получим на выходе опорного канала перед АЦП сигнальное множество, которое запишем в упрощённом виде (6). Первое слагаемое в (6) описывает постоянный уровень сигнала на выходе нелинейного приёмника 4 (рис. 4), определяемый амплитудами информационных частот. Второе, третье и четвёртое слагаемые описывают вклад в общий сигнал колебаний на информационных частотах.

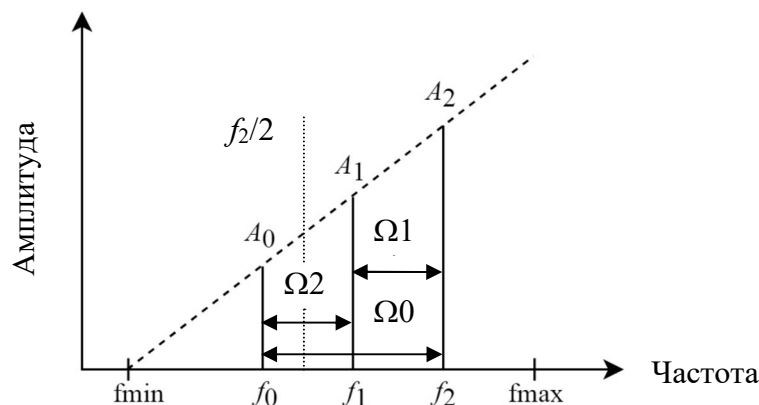


Рис. 8. Ситуационное расположение троек частот на выходе ВДФ для i -й решётки
Fig. 8. Situational arrangement of frequency triples at the output of the HQF for the i -th array

$$\begin{aligned}
I(t) = & \sum_{i=1}^N (A_{0,i}^2 + A_{1,i}^2 + A_2^2) + \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \left[A_{0,i} A_2 \cos(\Omega_{0,i} t) + \right. \\
& + A_2 A_{1,i} \cos(\Omega_{1,i} t) + A_{1,i} A_{0,i} \cos((\Omega_{0,i} - \Omega_{1,i}) t) \left. \right] \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left[\begin{aligned} & A_{0,i} A_{0,k} \cos((\Omega_{0,i} + \Omega_{0,k}) t) + \\ & + A_{0,i} A_{1,k} \cos(\Omega_{0,i} + \Omega_{1,k}) t + \\ & + A_{0,i} A_2 \cos(\Omega_{0,i} - f_D) t \end{aligned} \right] + \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left[\begin{aligned} & A_{1,i} A_{0,k} \cos((\Omega_{1,i} + \Omega_{0,k}) t) + \\ & + A_{1,i} A_{1,k} \cos((\Omega_{1,i} + \Omega_{1,k}) t) + \\ & + A_{1,i} A_2 \cos((\Omega_{1,i} - f_D) t) \end{aligned} \right] + \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left[\begin{aligned} & A_2 A_{0,k} \cos((f_D - \Omega_{0,k}) t) + \\ & + A_2 A_{1,k} \cos((f_D - \Omega_{1,k}) t) + \\ & + A_2^2 \end{aligned} \right]. \quad (6)
\end{aligned}$$

Три последние суммы в (6) описывают вклад в результирующий сигнал всех перекрёстных биений информационных частот от разных составляющих массива целей (возможно наличие паразитных составляющих высших порядков при «малых» скоростях движения целей).

Подставив (3) и (4) в (6), получаем зависимость выходного тока нелинейного приёмника, от N неизвестных величин $\Omega_{0,i}$ и $\Omega_{1,i}$, каждая из которых зависит от $f_{DFSi} \pm f_D/2$.

Далее просканируем полученный спектр полосовым фильтром $F(\Omega_F, \Omega)$. Классической функцией для полосового фильтра могла бы быть дельта-функция Дирака, но мы применим функцию нормального распределения, отличающуюся от классической только нормирующим множителем. Таким образом функция полосового фильтра везде равняется $F(\Omega_F, \Omega) = 0$ ($\Omega \neq \Omega_F$), за исключением окрестности точки Ω_F , где она равна $F(\Omega_F, \Omega_F) = 1$:

$$F(\Omega_F, \Omega) = \exp\left(-\frac{(\Omega - \Omega_F)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

где Ω_F – информационная частота, σ – добротность фильтра.

После нахождения фильтром информационной частоты Ω_F в спектре преобразованного сигнального множества (6), с учётом известной частоты сплиттирования и взаимного расположения информационных частот в каждой тройке относительно её половины, введём в рассмотрение объединённое множество значений частот, объединив нулевую частоту (постоянный уровень сигнала), множество информационных частот $\Omega_{0,i}$, $\Omega_{1,i}$ и множество их разностей $\Omega_{2,i}$:

$$\begin{aligned}
& \{\Omega_{F,n}\}_{n=1, 2N+1} = \\
& = \{0\} \cup \{\Omega_{0,i}\} \cup \{\Omega_{1,i}\} \cup \{\Omega_{2,i}\}, \forall i = \overline{1, N}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Отфильтровав все компоненты сигнала (6) по частотам (8), получим переопределённую систему из $2N+1$ уравнений для нахождения N неизвестных $\Omega_{0,i}$ и $\Omega_{1,i}$, а также их амплитуд. Решение переопределённой системы уравнений можно проводить методом наименьших квадратов, путём поиска экстремума функции:

$$\begin{aligned}
& \Phi(f_{DFSi} \pm f_D/2) = \\
& = \sum_{n=1}^{2N+1} \left[\left(I(\Omega_{F,n}) - I_{F,n} \right)^2 \right] \rightarrow \min, \quad (9)
\end{aligned}$$

где за $I_{F,n}$ обозначена амплитуда выходного сигнала нелинейного приёмника на частоте $\Omega_{F,n}$. Требование (9) эквивалентно требованию равенства нулю всех частных производных по искомым переменным $f_{DFSi} \pm f_D/2$, что приводит к системе из N нелинейных уравнений:

$$\partial \Phi / \partial (f_{DFSi} \pm f_D/2) = 0, \forall i = \overline{1, N}. \quad (10)$$

Нелинейную, в силу нелинейности частных производных $\partial \Phi / \partial (f_{DFSi} \pm f_D/2)$ ($i = \overline{1, N}$), систему уравнений (10) можно решить только численно. В качестве начальных условий можно взять те значения $(f_{DFSi} \pm f_D/2)$, которые являются решением системы уравнений (6), в которых предполагается, что последних трёх двойных сумм не существует и система уравнений распадается на множество уравнений второго порядка, выбор решения однозначен.

чен, поскольку одно из них строго положительное, второе отрицательное. После чего система уравнений (10), дополненная начальными значениями, решается любым хорошо сходящимся итерационным методом, например, Левенберга–Маргвардта или Ньютона–Раффсона.

Полученные результаты оценочного моделирования показывают, что предложенный метод определения ДСЧ и его знака с помощью БПФ и сканирующей фильтрации на два порядка лучше, чем определение информационной частоты по обобщённому коэффициенту модуляции [16] и является удовлетворительным для высокоточных измерений.

Абсолютная погрешность определения ДСЧ по частоте информационных сигналов зависит от полосы пропускания программного сверхзаклопосного фильтра (единицы Гц). Относительная погрешность определения амплитуд информационных сигналов не превышает $\pm 10^{-3}$ почти во всём диапазоне амплитуд аппаратного линейного фильтра. Отношение D полученных амплитуд для пары поставленных в соответствие частот ДСЧ определённой цели позволяет установить его знак: при $D < 1$ цель удаляется, при $D > 1$ цель приближается. Методом, аналогичным методу для многоцелевого сопровождения непрерывной РЛС, может быть решена задача определения ДСЧ и его знака в импульсных РЛС.

Заключение. Разработан программно-аппаратный анализатор выходного спектра радиофотонных устройств измерения ДСЧ и его знака. Предложены варианты его математического обеспечения

для решения типовых задач доплеровских измерений при одно- и многоцелевом сопровождении в непрерывных и импульсных РЛС. Основное целевое назначение анализатора – решение задач определения величины и знака ДСЧ при использовании радиофотонного устройства на основе тандемных однопортовых амплитудного и фазового модуляторов (ТАФМ).

Проведены вычислительные эксперименты для верификации принципов работы математического обеспечения анализатора. Абсолютная погрешность определения ДСЧ по частоте информационных сигналов зависит от полосы пропускания программного сверхзаклопосного фильтра анализатора (единицы Гц). Относительная погрешность определения амплитуд информационных сигналов не превышает $\pm 10^{-3}$ почти во всём диапазоне амплитуд аппаратного линейного фильтра анализатора. Отношение D полученных амплитуд для пары поставленных в соответствие частот ДСЧ определённой цели позволяет установить его знак: при $D < 1$ цель удаляется, при $D > 1$ цель приближается.

Новый программно-аппаратный анализатор выходного спектра радиофотонных устройств измерения ДСЧ и его знака представляет собой простое, недорогое и надёжное решение, которое преодолевает недостатки известных решений. Его преимущества могут стать более существенными при построении измерителя по технологиям микроволновых фотонных интегральных схем, в многоканальных радиофотонных трактах [19], в том числе для решения типовых задач РЛС по определению угла прихода [20].

Список источников

1. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 6–42.
2. Photonics for microwave measurements / X. Zou, B. Lu, W. Pan et al. // Laser Photon. Rev. 2016. Vol. 10(5). Pp. 711–734.
3. Pan S., Zhang Y. Microwave Photonic Radars // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38 (19). Pp. 5450–5484.
4. Photonic approach to wide-frequency-range high-resolution microwave/millimeterwave doppler frequency shift estimation / X. Zou, W. Li, B. Lu et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2015. Vol. 63(4). Pp. 1421–1430.
5. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction ambiguity resolution using optical frequency shift and optical heterodyning / B. Lu, W. Pan, X. Zou et al. // Opt. Lett. 2015. Vol. 40(10). Pp. 2321–2324.
6. Wideband microwave doppler frequency shift measurement and direction discrimination using pho-

tonic I/Q detection / B. Lu, W. Pan, X. Zou et al. // J. Lightw. Technol. 2016. Vol. 34(20). Pp. 4639–4645.

7. A simplified photonic approach to measuring the microwave Doppler frequency shift / L. Xu, Y. Yu, H. Tang et al. // IEEE photonics technology letters. 2018. Vol. 30(3). Pp. 246–249.

8. Huang C., Chan E.H.W., and Albert C.B. Wideband DFS measurement using a low-frequency reference signal // IEEE photonics technology letters. 2019. Vol. 31(20). Pp. 1643–1646.

9. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction discrimination based on a DPMZM / W. Chen, A. Wen, X. Li et al. // IEEE Photonics Journal. 2017. Vol. 9(2). P. 5501008.

10. Huang C. and Chan E.H.W. All-Optical pulsed signal Doppler frequency shift measurement system // IEEE Photonics Journal. 2021. Vol. 13(6). P. 5800107.

11. Радиофотонный метод определения доплеровского изменения частоты отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 2 (50). С. 63–75.

12. 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 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 2 (16). С. 3–12.

13. Измерение мгновенной частоты микроволновых сигналов с использованием тандемной амплитудно-фазовой модуляции в оптическом диапазоне / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Са-

хабутдинов и др. // Фотон-экспресс. 2019. № 5 (157). С. 16–24.

14. Радиофотонный метод определения угла прихода отраженного радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1 (49). С. 50–62.

15. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры / Д.И. Касимова, А.А. Кузнецов, П.П. Крыницкий и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2 (18). С. 73–81.

16. Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 4. С. 535–543.

17. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбах и др. // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 6–13.

18. Радиофотонный метод измерения мгновенных частот множества радиосигналов на основе аддитивного частотного смещения с расширенным диапазоном измеряемых частот / А.А. Иванов, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 85–86.

19. Многоканальный радиофотонный приемный тракт / С.М. Конторов, А.В. Шипулин, Ф. Кюпперс и др. // Фотоника. 2019. Т. 13. № 9. С. 584–593.

20. Chen H. and Chan E.H.W. Angle of arrival measurement system using double RF modulation technique // IEEE Photonics Journal. 2019. Vol. 11(1). Pp. 1–10.

Статья поступила в редакцию 15.11.2021; одобрена после рецензирования 06.12.2021; принята к публикации 15.12.2021

Информация об авторах

МОРОЗОВ Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий; директор НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника. Автор 455 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0003-4779-4656

МОРОЗОВ Геннадий Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – антенны, микроволновые технологии, микроволновая фотоника. Автор 355 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0002-9420-0710

ИЛЬИН Герман Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронных и квантовых систем передачи информации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – лазерные и радиотехнические системы, теория потенциальной помехоустойчивости. Автор 355 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0002-8915-940X

НУРЕЕВ Ильнур Ильдарович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиوفотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – волоконно-оптические датчики и информационно-измерительные сети. Автор 250 научных публикаций. ORCID: 0000-0003-4895-2695

САХАБУТДИНОВ Айрат Жавдатович – доктор технических наук, профессор кафедры радиوفотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 155 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0002-0713-7806

РОСТОКИН Илья Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры управления и контроля в технических системах, Муромский институт имени В.К. Зворыкина, филиал Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Область научных интересов – микроволновая радиометрия, радиوفотоника и системы дистанционного зондирования. Автор 100 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0003-3698-2168

МАЛЬЦЕВ Андрей Владимирович – главный специалист в области информационной безопасности, РФ АО «Россельхозбанк». Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. ORCID: 0000-0002-9255-9076.

ИВАНОВ Александр Алексеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиوفотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника. Автор 40 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0002-7238-271X

ЛУСТИНА Александра Алексеевна – ведущий инженер отдела интеллектуальной собственности и трансфера технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника, измерительные СВЧ-системы. Автор 10 научных публикаций. ORCID: 0000-0002-9921-4599

ДЕНИСЕНКО Евгений Петрович – доцент кафедры радиوفотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы. Автор 30 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0003-3359-8910

ДЕНИСЕНКО Павел Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиوفотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – радиовотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 30 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0003-3452-2723

АНДРЕЕВ Владимир Дмитриевич – международным экспертом, АНО «Агентство развития профессионального мастерства». Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 25 научных публикаций и патентов. ORCID: 0000-0001-9161-8348

Вклад авторов:

Морозов О. Г. – концептуализация, написание – просмотр и редактирование, привлечение финансирования.

Морозов Г. А. – методология.

Ильин Г. И. – методология.

Нуреев И. И. – проверка, формальный анализ, наблюдение, привлечение финансирования.

Сахабутдинов А. Ж. – математическое обеспечение, визуализация.

Ростокин И. Н. – проверка, формальный анализ, привлечение финансирования.

Мальцев А. В. – сбор данных и вычислительный эксперимент, написание – подготовка оригинала черновика.

Иванов А. А. – исследование, администрация проекта.

Лустина А. А. – сбор данных и вычислительный эксперимент, написание – подготовка оригинала черновика.

Денисенко Е. П. – сбор данных и вычислительный эксперимент, написание – подготовка оригинала черновика.

Денисенко П. Е. – исследование, администрация проекта.

Андреев В. Д. – сбор данных и вычислительный эксперимент, написание – подготовка оригинала черновика.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.383

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.65>

Software Hardware Spectrum Analyzer for Radio Photonic Devices for Measuring Doppler Shift and its Sign

O. G. Morozov^{1✉}, G. A. Morozov¹, G. I. Il'in¹,

I. I. Nureev¹, A. Zh. Sahabudinov¹, I. N. Rostokin², A. V. Mal'cev¹,

A. A. Ivanov¹, A. A. Lustina¹, E. P. Denisenko¹, P. E. Denisenko¹, V. D. Andreev¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,
10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russian Federation

OGMorozov@kai.ru✉

²Murom Institute named after V.K. Zvorykin,
branch of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov,
23, st. Orlovskaya, Murom, 602264, Russian Federation

Keywords: radiophotonics; radar; continuous wave and pulse radars; single-target and multiple-target tracking mode; Doppler shift; typical problems of determining the magnitude of the Doppler shift and its sign; software hardware spectrum analyzer

ABSTRACT

Introduction. There is a constantly growing interest in the use of radio photonic technologies (RPT) for processing radar signals. This is due the benefits typical for RFT such as a wide bandwidth, high measurement rate, low frequency-dependent losses, resistance to electromagnetic interferences. Among the various parameters of radar signals, Doppler shift (DS) is one of the most frequently used. It is crucial for both ranging and Doppler radar systems (RS) of military and civil applications. DS is the difference between the frequency of the signal reflected from the target and the frequency of the radar transmitter. It is used to determine the speed and direction of the target. DS measurement with the use of RFT is typically implemented by measuring the beat-note frequency between the transmitted and echo signals, and their relation with the reference frequency to determine the direction of the target movement (DS sign). **The aim** of the research is to develop a software hardware spectrum analyzer, its universal algorithms and math support for solving typical problems of measuring the DS magnitude and sign in radio photonic devices, regardless of their structure, with the possibility of compensating measurement errors by computational methods. **Findings.** There were studied spectral situations, mostly three-frequency ones, which are observed in radio photonic devices with target tracking by a continuous wave radar. The problem of determining speed and trajectory of the target was posed for each device and the universal math fundamentals were analyzed to solve them. Multi-frequency situations were considered. They typically occur in multiple-targets tracking cases with the use of continuous wave radars or in variants of measuring DS with the use of pulse radar. For their solution we created a universal software and gave an estimate of measurement errors. The absolute error in determining the DS by the frequency of information signals depends on the bandwidth of the ultra-narrowband filter (units of Hz) implemented in software. The relative error in measuring the amplitudes of information signals did not exceed $\pm 10\text{--}3$ in almost the entire range of amplitudes of the linear filter implemented in hardware. **Conclusions.** The developed software hardware spectrum analyzer for measuring the DS and its sign at the output of radiophotonic devices is a simple, low-cost and reliable development that overcomes the limitations of known solutions. The advantages of the analyzer can become more significant if it is built on a single platform with a radio photonic device by means of microwave photonic integrated circuit technologies as well as if it is used for multichannel radio photonic paths, including typical problems of determining the angle of arrival of multiple targets by the radar system.

Funding: The research was supported by the grants No. 075-03-2020-051, fzs-2020-0020 of the "Fokrat" program as a part of the government contract of Kazan National Research Technical University and the Priority 2030 program from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; the grant No. 21-19-00378 from the Russian Science Foundation.

REFERENCES

1. Morozov O.G., Ilin G.I. Amplitudno-fazovaya moduljacija v sistemah radiofotoniki [Amplitude-phase modulation in microwave photonics systems]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2014. No 1(20). P. 6-42. (In Russ.).
2. Zou X., Lu B., Pan W. et al. Photonics for microwave measurements. *Laser Photon. Rev.* 2016. Vol. 10(5). Pp. 711–734.
3. Pan S., Zhang Y. Microwave Photonic Radars. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. Vol. 38 (19). Pp. 5450-5484.
4. Zou X., Li W., Lu B. et al. Photonic approach to wide-frequency-range high-resolution microwave/millimeterwave doppler frequency shift estimation. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2015. Vol. 63(4). Pp. 1421–1430.
5. Lu B., Pan W., Zou X. et al. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction ambiguity resolution using optical frequency shift and optical heterodyning. *Opt. Lett.* 2015. Vol. 40(10). Pp. 2321–2324.
6. Lu B., Pan W., Zou X. et al. Wideband microwave doppler frequency shift measurement and direction discrimination using photonic I/Q detection. *J. Lightw. Technol.* 2016. Vol. 34(20). Pp. 4639–4645.
7. Xu L., Yu Y., Tang H. et al. A simplified photonic approach to measuring the microwave Doppler frequency shift. *IEEE photonics technology letters*. 2018. Vol. 30(3). Pp. 246-249.
8. Huang C., Chan E.H.W., and Albert C.B. Wideband DFS measurement using a low-frequency reference signal. *IEEE photonics technology letters*. 2019. Vol. 31(20). Pp. 1643-1646.
9. Chen W., Wen A., Li X. et al. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction discrimination based on a DPMZM. *IEEE Photonics Journal*. 2017. Vol. 9(2). P. 5501008.
10. Huang C. and Chan E.H.W. All-Optical pulsed signal Doppler frequency shift measurement system. *IEEE Photonics Journal*. 2021. Vol. 13(6). P. 5800107.
11. Morozov O.G., Morozov G.A., Ilin G.I. et al. Radiofotonnyj metod opredelenija doplerovskogo izmenenija chastoty otrazhonnogo radiolokacionnogo signala na osnove tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji [Microwave photonic method for measuring Doppler shift of radar echo signal with tandem amplitude-phase modulation]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2021. No 2(50). P. 63-75. (In Russ.).
12. Talipov A.A., Morozov O.G., Il'in G.I., et al. Metod formirovanija dvuchastotnogo izlucheniya dlja sinteza solitonov i primeneniya spektral'no-jeffektivnoj moduljacji RZ i CSRZ formatov v opticheskikh setjah dostupa [Method of the formation of two-frequency radiation for the soliton synthesis and the application of spectral-effective modulation of RZ and CSRZ formats in optical access networks]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2012. No 2(16). P. 3-12. (In Russ.).
13. Morozov O.G., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh. et al. Izmerenie mgnovennoj chastoty mikrovolnovykh signalov s ispol'zovaniem tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji v opticheskom diapazone [Measurement of the instantaneous frequency of microwave signals with the use of tandem amplitude-phase modulation in the optical range]. *Foton-Jekspress* [Photon-Express]. 2019. No 5(157). P. 16-24. (In Russ.).
14. Morozov O.G., Morozov G.A., Il'in G.I. et al. Radiofotonnyj metod opredelenija ugla prihoda otrazhennogo radiolokacionnogo signala na osnove tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji [Microwave photonic method for measuring the angle-of-arrival of radar echo signal with tandem amplitude-phase modulation]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2021. No 1(49). P. 50-62. (In Russ.).
15. Kasimova D.I., Kuznecov A.A., Krynickij P.P. et al. Ocenka vozmozhnostej primeneniya volokonnykh reshetok Brjeggja s gaussovym profilom otrazhenija v kachestve datchika temperatury [Estimation of possibilities of the application of fibre Bragg gratings with a Gaussian reflection profile as a temperature sensor]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology.

Series “Radio Engineering and Infocommunication Systems”]. 2013. No 2(18). P. 73-81. (In Russ.).

16. Morozov O.G., Sahabutdinov A.Zh. Adresnye volokonnye brjegovskie struktury v kvaziraspredeljonnyh radiofotonnyh sensornyh sistemah [Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems]. *Kompyuternaja optika* [Computer Optics]. 2019. Vol. 43. No 4. P. 535-543. (In Russ.).

17. Agliullin T.A., Anfinogentov V.I., Misbahov R.Sh. et al. Mnogoadresnye volokonnye brjegovskie struktury v radiofotonnyh sensornyh sistemah [Multicast fiber Bragg structures in microwave photonics sensor systems]. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi* [Proc. of Telecom. Universities]. 2020. Vol. 6. No 1. P. 6-13. (In Russ.).

18. Ivanov A.A., Morozov O.G., Sahabutdinov A.Zh. et al. Radifotonnyj metod izmerenija

mgnovennyh chastot mnozhestva radiosignalov na osnove additivnogo chastotnogo smeshhenija s ras-shirennym diapazonom izmerjaemyh chastot [Radio-photon method for measuring instantaneous frequencies of multiple radio signals based on additive frequency shift with an extended range of measured frequencies]. *Foton-Jekspress* [Photon-Express]. 2019. No 6(158). P. 85-86. (In Russ.).

19. Kontorov S.M., Shipulin A.V., Kjuppers F., Valuev V.V. Mnogokanal'nyj radiofotonnyj priemnyj trakt [Multi-channel radio photon receiving path]. *Fotonika* [Photonics]. 2019. Vol. 13. No 9. P. 584-593. (In Russ.).

20. Chen H. and Chan E.H.W. Angle of arrival measurement system using double RF modulation technique. *IEEE Photonics Journal*. 2019. Vol. 11(1). Pp. 1-10.

The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 06.12.2021; accepted for publication 15.12.2021

For citation: Morozov O. G., Morozov G. A., Il'in G. I., Nureev I. I., Sahabutdinov A. Zh., Rostokin I. N., Mal'cev A. V., Ivanov A. A., Lustina A. A., Denisenko E. P., Denisenko P. E., Andreev V. D. Software Hardware Spectrum Analyzer for Radio Photonic Devices for Measuring Doppler Shift and its Sign. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 1 (53). Pp. 65–80. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.65>

Information about the authors

Oleg G. Morozov – Doctor of Sciences Degree in Engineering, Professor, holds a position of the Head of the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies at Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics. The author of 455 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0003-4779-4656

Gennady A. Morozov – Doctor of Sciences Degree in Engineering, professor, professor at the Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems at Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI. Research interests – antennas, microwave technologies, microwave photonics. The author of 355 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0002-9420-0710

German I. Ilyin – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Electronic and Quantum Systems for Data Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – laser and radio engineering systems, theory of potential noise immunity. The author of 355 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0002-8915-940X

Ilmur I. Nureev – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Radio-Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 250 scientific publications. ORCID: 0000-0003-4895-2695

Airat J. Sakhabutdinov – Doctor of Sciences Degree in Engineering, Professor at the Radio Photonics and Microwave Technologies Department at Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 152 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0002-0713-7806

Ilya N. Rostokin – Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Management and Control in Technical Systems, Murom Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolay Grigoryevich Stoletovs”. Research interests – microwave radiometry, radio-photonics and remote sensing systems. The author of 100 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0003-3698-2168

Andrej V. Malcev – data security officer at Russian Federation JSC "Rosselkhozbank". Research interest – microwave photonics; fiber optic sensors and interrogation systems. ORCID: 0000-0002-9255-9076.

Aleksandr A. Ivanov – Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer at the Department of Radio-Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics. The author of 40 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0002-7238-271X

Alexandra A. Lustina – Leading Engineer at the Department of Intellectual Property and Technology Transfer, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, microwave measuring systems. The author of 10 scientific publications. ORCID: 0000-0002-9921-4599

Evgeniy P. Denisenko – Associate Professor at the Department of Radio-Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, fiber optic sensors and systems. The author of 30 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0003-3359-8910

Pavel E. Denisenko – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Radio-Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – radio-photonics, fiber optic sensors and interrogation systems. The author of 30 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0003-3452-2723

Vladimir D. Andreev – international expert, Autonomous non-profit organization "Skills development agency (WorldSkills Russia)". Research interests – microwave photonics; fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 25 scientific publications and patents. ORCID: 0000-0001-9161-8348

Contribution of authors:

Morozov O. G. – concept, writing - viewing and editing, fundraising.

Morozov G. A. – methodology.

Ilyin G. I. – methodology.

Nureev I. I. – verification, formal analysis, observation, fundraising.

Sakhabutdinov A. Zh. – math support, visualization.

Rostokin I. N. – verification, formal analysis, fundraising.

Maltsev A. V. – data gathering and computational experiment, writing - original draft.

Ivanov A. A. – research, project administration.

Lustina A. A. – data gathering and computational experiment, writing - original draft.

Denisenko E. P. – data gathering and computational experiment, writing - original draft.

Denisenko P. E. – research, project administration.

Andreev V. D. – data gathering and computational experiment, writing - original draft.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.