

УДК 621.37:621.39

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ЦИФРОВОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРИЁМНИКА С СУБДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ

Д. В. Кондаков<sup>1,2</sup>, А. П. Лавров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

<sup>2</sup> ООО "Специальный технологический центр",  
195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д.21

Статья поступила в редакцию 15 января 2019 г.

**Аннотация.** В статье анализируется работа цифрового приемника широкополосного сигнала, модель которого – совокупность нескольких одновременно присутствующих гармонических сигналов. Приемник реализуется как многоканальное устройство с параллельной работой каналов в режиме субдискретизации с отличающимися частотами. В каналах после субдискретизации выполняется аналого-цифровое преобразование, и затем спектральный анализ, по результатам которого по специальному алгоритму производится отбор (восстановление) значений частот входного многокомпонентного сигнала. Такой приемник рассматривается как альтернатива обычным приемникам с перестраиваемым гетеродином. Приводятся модель преобразования сигналов в предлагаемом приемнике, и результаты численного моделирования его работы – определения частот входных сигналов при нескольких (до 6) параллельно работающих каналах, и нескольких – до 5 одновременно присутствующих частот на его входе, субдискретизация – вплоть до 20-й (и более) зоны Найквиста. Моделирование работы приемника проводится как во временной, так и в частотной областях.

**Ключевые слова:** многоканальный приёмник, субдискретизация, многокомпонентный сигнал.

**Abstract.** The major objective of this research was to investigate the operation of a digital wideband receiver. In particular, this study will examine an inputs' model, which consists of a combination of several simultaneously existing harmonic signals.

The receiver represents a multichannel device with parallel operation of channels in the subsampling mode. The case of different channels' sampling frequencies is assumed. After the downsampling, in all channels an analog-to-digital conversion is performed, and then – spectrum analysis. The spectrum analysis results are used to restore the frequencies of the input multi-component signal. The model of signal conversion in the proposed receiver is presented, as well as the results of numerical simulation of its operation. To be more exact, the following aspects are found out: determining of the input signals' frequencies with multiple (up to 6) channels in parallel, and several - up to 5 simultaneously present receiver input frequencies with subsampling from up to 20-th Nyquist zone.

**Key words:** multichannel receiver; subsampling; multicomponent signal.

## 1. Введение

За последнее время большое развитие среди измерительных приборов при решении задач как лабораторного прототипирования, так и серийного производства радиоэлектронной аппаратуры, получили цифровые анализаторы спектра. Они обладают широким диапазоном рабочих частот, высоким разрешением, низким уровнем собственных фазовых шумов, а также широким динамическим диапазоном. Кроме того, современные цифровые анализаторы спектра имеют возможность для проведения измерений сигналов в режиме реального времени. Мгновенная полоса частот анализируемых сигналов может достигать сотен мегагерц [1]. Однако имеется и потребность в больших полосах мгновенного спектрального анализа.

Структурная схема типового цифрового анализатора спектра изображена на рис. 1 [2, 3]. В схеме использованы стандартизованные обозначения функций, выполняемые отдельными блоками схемы. Ограничение полосы мгновенного анализа обусловлено следующими факторами:

1. полоса пропускания фильтра промежуточной частоты;
2. полоса аналого-цифрового преобразователя;
3. быстродействие устройства цифровой обработки.

Широкий диапазон рабочих частот обеспечивается последовательной перестройкой гетеродина Г1. В каждый момент времени анализатор спектра настроен на определенную часть рабочего диапазона частот. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) работает с выбранной зоной Найквиста. Информация о спектре последовательно выводится на экран. Очевидно, что анализатор, являясь устройством с последовательным типом измерения [4], не может обеспечить анализ сигналов с мгновенной полосой более широкой, чем полоса пропускания фильтра промежуточной частоты.

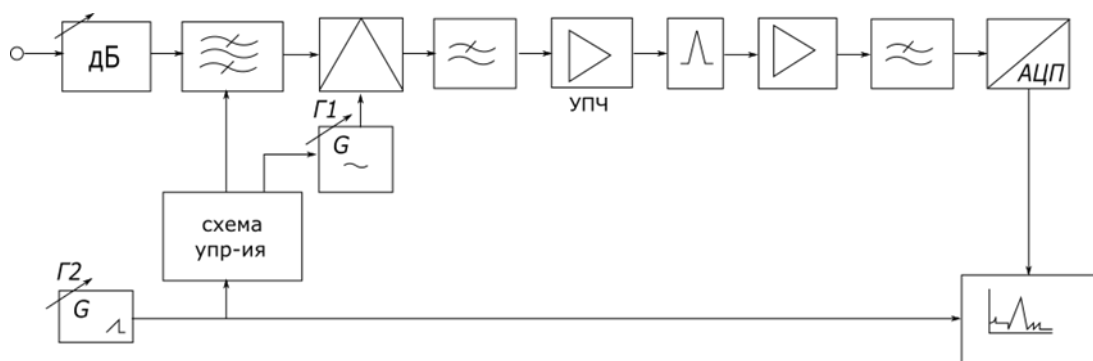


Рис. 1. Структурная схема цифрового анализатора спектра.

В качестве альтернативы описанной структурной схеме, в работе анализатора спектра может быть применен метод субдискретизации сигнала. Это частный случай дискретизации, когда частота взятия временных отчётов аналого-цифровым преобразователем много меньше частоты, определяемой по теореме Котельникова-Найквиста. Авторам известно об использовании субдискретизации с целью расширения рабочего частотного диапазона, а также для повышения быстродействия частотомеров еще в 80-х годах XX века [5]. Как будет показано далее, субдискретизация позволяет не только расширить диапазон рабочих частот, но и увеличить мгновенную полосу анализа сигналов.

## 2. Принцип работы

Рассмотрим модель многоканального приемника сигналов, структурная схема которого изображена на рис. 2. Для примера количество каналов  $N$  здесь взято равным 6.

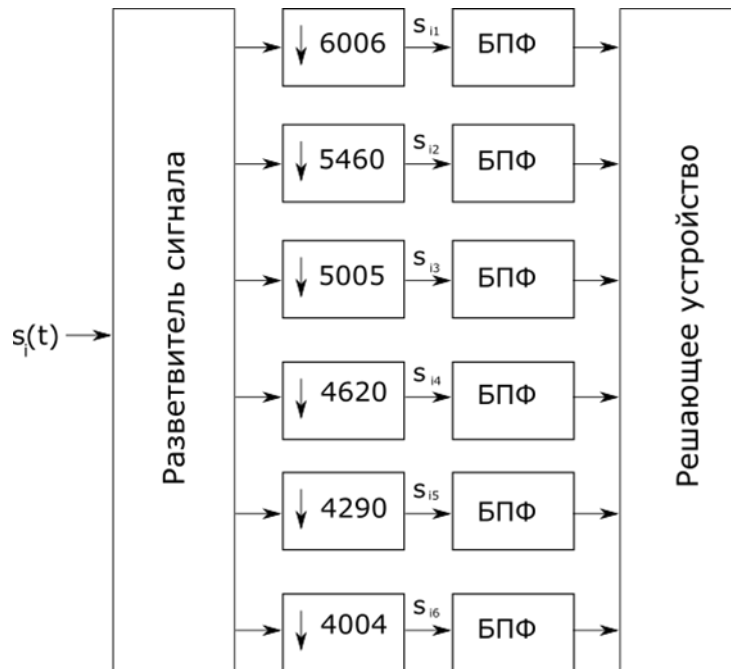


Рис. 2. Структурная схема модели многоканального приёмника.

Моделирование процессов субдискретизации производится для модели входного многокомпонентного сигнала – как суммы гармонических функций в виде

$$s_i(t) = A \sum_{j=1}^M \sin(2\pi f_j t_i) \quad . (1)$$

где  $A_j$  – амплитуда  $j$ -ой компоненты (здесь взят случай одинаковых амплитуд  $A_j = A$ ),  $f_j$  – частота  $j$ -ой компоненты,  $t_i$  – последовательность временных отсчетов (здесь уже рассмотрена дискретизация по времени, см. замечание ниже),  $M$  – количество частотных компонент сигнала.

Для простоты численного моделирования оно проводится с привязкой к конкретным (низким) частотам, однако получаемые результаты могут быть перенесены (масштабированы) на высокие тактовые частоты работы каскадов приемника. Заметим, что при моделировании процессов субдискретизации сигнал на входе приемника удобно сразу представить в дискретизированном виде  $s_i(t) = s(t_i)$ . Частоту  $F_S$  взятия дискретных отсчётов сигнала  $s_i(t)$  выбирается таким образом, чтобы она являлась наименьшим общим кратным для выбранных частот дискретизации  $F_{LO_n}$ . В нашем моделировании это были частоты (10, 11, 12, 13, 14, 15) Гц для 6 каналов приемника (номера каналов  $n$ :

1-6, соответственно), см. табл. 1. В итоге, получено значение  $F_S = 60060$  Гц. При такой «исходной» частоте дискретизации субдискретизированные отсчеты в каждом из каналов приемника получают простым способ – прореживанием исходного ряда с целочисленным коэффициентом децимации, см. табл. 1.

Таблица 1. Характеристики каналов приёмника.

Канал, n	Эффективная частота дискретизации в канале, $F_{L0n}$ , Гц	Коэффициент децимации исходного ряда	Верхняя граница 1-й зоны Найквиста, Гц
1	$10 = 2 \cdot 5$	6006	5,0
2	$11 = 1 \cdot 11$	5460	5,5
3	$12 = 2 \cdot 2 \cdot 3$	5005	6,0
4	$13 = 1 \cdot 13$	4620	6,5
5	$14 = 2 \cdot 7$	4290	7,0
6	$15 = 3 \cdot 5$	4004	7,5

В схеме на рис. 2 входной сигнал, пройдя через разветвитель-делитель, в каждом из параллельных каналов децимируется с фиксированным коэффициентом, указанном в табл. 1. Блоки децимации реализуют эффект подмены спектра (aliasing, алиасинг), который характерен для сигнала, оцифрованного с помощью АЦП, работающего в режиме субдискретизации. Далее в приемнике сигналы поступают на блоки быстрого преобразования Фурье (БПФ) с числом точек в выборке  $N_{\text{FFT}}$ . Моделирование осуществлялось с  $N_{\text{FFT}} = 128$ , и для выборок была применена простейшая (прямоугольная) весовая функция (окно). Для получения данного количества точек  $N_{\text{FFT}} = 128$  требуется, чтобы генерируемый исходный сигнал  $s_i(t)$  имел 768768 отсчетов на частоте  $F_S$ , что соответствует длительности 12,8 секунд. Результаты преобразования Фурье (БПФ) поступают на блок Решающее устройство (РУ), который осуществляет отбор частотных откликов (критерий – превышение откликов над пороговым уровнем) и по ним восстанавливает спектр исходного (входного) сигнала приемника. На рис. 3 во временной области изображены первые 20000 отсчетов сгенерированного входного сигнала  $s_i(t)$ , представляющего собой сумму 6

синусоидальных компонент с частотами  $f_j = \{17; 18; 23; 35; 41; 53\}$  Гц. Компоненты имеют одинаковые амплитуды  $A_j = 1$ , но случайные начальные фазы. Моделирование работы входной части приемника (субдискретизация) и блоков БПФ выполнено в среде MATLAB.

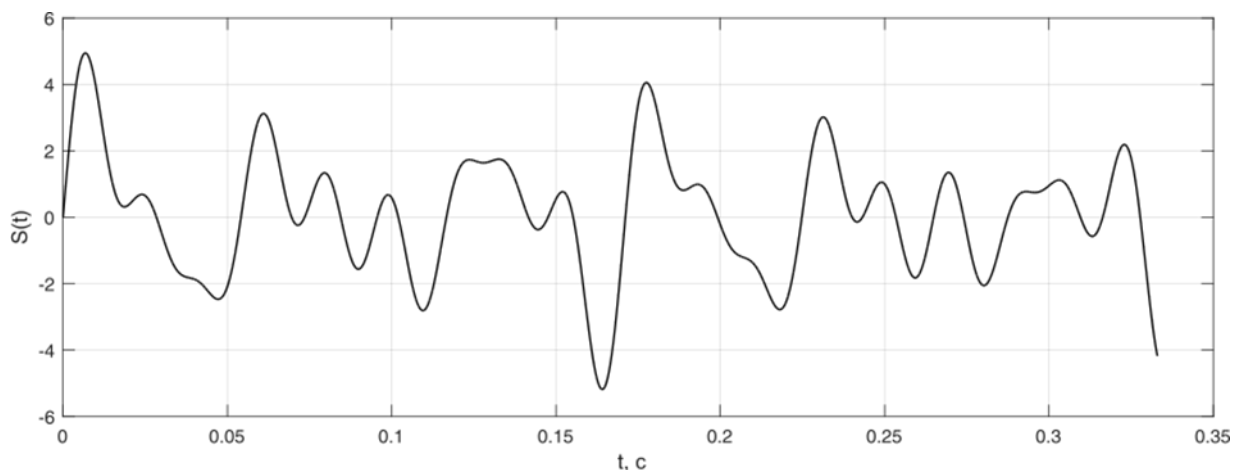


Рис. 3. Временное представление анализируемого сигнала  $s(t)$

Сигналы  $s_1(t) - s_6(t)$  на выходах блоков децимации во временной области представлены на рис. 4. На рис. 5 приведены результаты работы блоков БПФ – рассчитанные спектрограммы.

По спектрограммам первой зоны Найквиста, границы которых определяются частотой дискретизации  $F_{LOn}$ , см. табл. 1, для каналов преобразователя 1-6 можно сделать следующие выводы:

- 1) Исходные значения рассматриваемых входных частотных компонент  $f_j = \{17; 18; 23; 35; 41; 53\}$  Гц переносятся в первую зону Найквиста. Это объясняется алиасингом.
- 2) Наблюдаемые частотные отклики имеют разную спектральную плотность мощности, поскольку выбранные нами исходные частотные компоненты  $f_j$ , оказавшиеся в первой зоне Найквиста после субдискретизации с частотами  $F_{LOn}$ , могут интерферировать друг с другом.

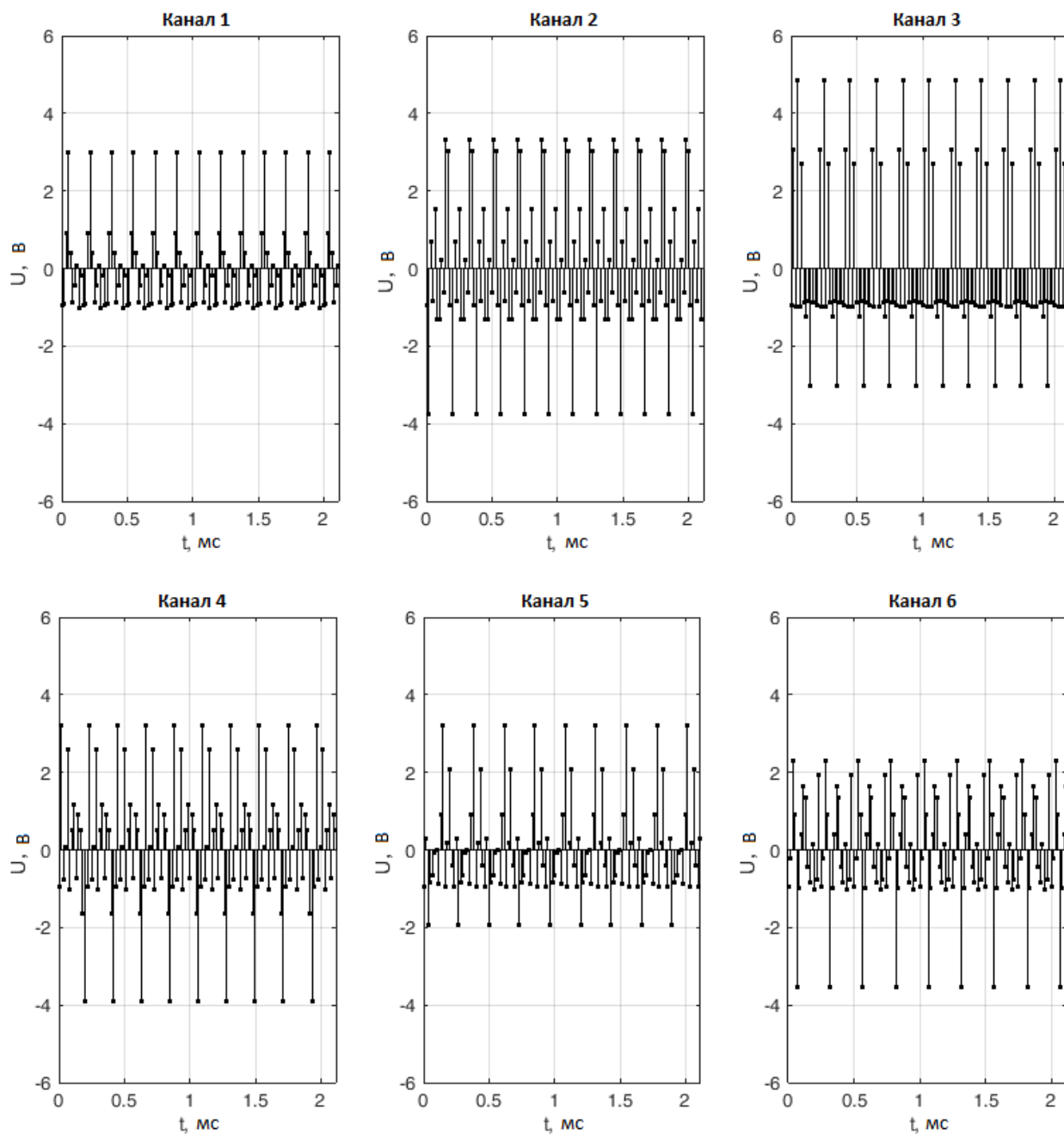


Рис. 4. Временное представление сигналов в каналах на выходе блока децимации.

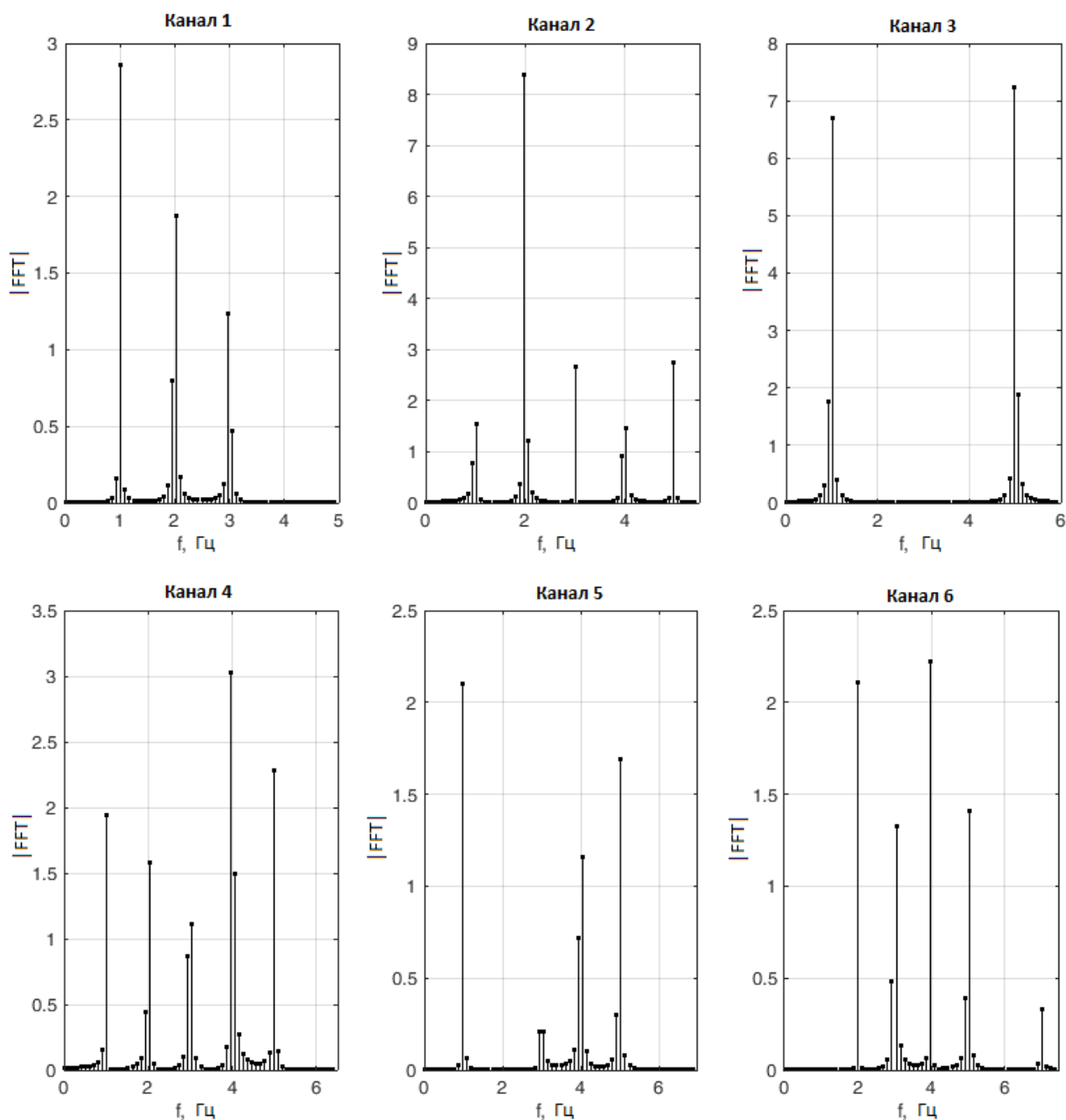


Рис. 5. Частотное представление сигналов в каналах на выходе блока БПФ.

### 3. Алгоритм восстановления значений частот входного сигнала

Согласно рис. 2. данные с блоков быстрого преобразования Фурье поступают на вход Решающего устройства. Его задача – восстановить спектральный состав исходного сигнала  $s_i(t)$  по совокупности спектров децимированного сигнала, полученных в каждом из 6 каналов приемника.



В РУ по его каждому входу выбираются спектральные отсчеты, превышающие заданный порог. Для первого канала в нашем примере это будут частоты 1, 2, 3 Гц; для 2-го канала – 1, 2, 3, 4, 5 Гц; для 3-го канала – 1, 5 Гц; для 4-го канала – 1, 2, 3, 4, 5 Гц, для 5-го канала – 1, 3, 4, 5 Гц; для 6-го канала – 2, 3, 4, 5, 7 Гц. Частоты этих отсчетов пронумеруем как  $f_{n,k}$ , где  $n$  – номер канала,  $k$  – порядковый номер частотного отсчета в канале. Восстанавливаемые возможные частоты исходного сигнала по данным  $n$ -го канала определяются соотношениями  $f(n,k,K) = K \cdot F_{LOn} \pm f_{n,k}$ , где  $K = 1, 2, 3$ , и т.д. В РУ реализуется алгоритм нахождения пересечения множеств  $f(n,k,K)$  по всем  $N$  каналам приемника. В результате математических преобразований удаётся получить набор исходных частот  $f_j = \{17; 18; 23; 35; 41; 53\}$  Гц. Более подробно описание алгоритма восстановления частот изложено в работах [6, 7].

#### 4. Заключение

В данной работе на основе анализа работы модели многоканального приемника, работающего с реализацией метода субдискретизации, постулируется возможность восстановления спектрального состава сложного многокомпонентного входного сигнала. Применение данного метода позволяет существенно упростить структурную схему приемника – измерителя мгновенной частоты сигналов. В приемнике реализуется параллельный метод измерения частот в нескольких параллельно работающих каналах с последующей обработкой этих параллельных данных в цифровом процессоре. Приведены результаты численного моделирования с представлением сигналов во временной и частотной областях на базе упрощенных моделей входного многокомпонентного (6 одновременно присутствующих компонент) радиосигнала и цифрового многоканального (6 параллельных каналов) приемника.

Результаты данной работы были представлены в докладе и обсуждались на XII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», 26 - 28 ноября 2018 г., г. Москва [8].

## Литература

1. N9041B Анализатор сигналов UXA, от 2 Гц до 110 ГГц [Электронный ресурс] URL: <https://www.keysight.com/ru/pdx-2743415-pn-N9041B/uxa-signal-analyzer-multi-touch-3-hz-to-110-ghz?cc=RU&lc=rus&state=0> (дата обращения: 02.10.2018).
2. Pozar D.M. Microwave engineering (3rd ed.). Hoboken, NJ: J. Wiley, 2005.
3. Agilent Technologies – Spectrum Analyzer Application Note 1286-1 [Электронный ресурс] URL: <http://rfmw.em.keysight.com/spectrum-analyzer> (дата обращения: 02.10.2018).
4. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Изд. 5-е. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009.
5. Gibson S.R. Gallium arsenide lowers cost and improves performance of microwave counters. // Hewlett-Packard J., 1982, No 2. P. 4-10.
6. Кондаков Д.В., Космынин А.Н., Лавров А.П. Алгоритм оценки частот многокомпонентного сигнала в цифровом приёмнике с субдискретизацией // XXIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь»: труды конф., Воронеж: Изд-во ВГУ, 2017. Том II, С. 481-486.
7. Kondakov D., Kosmynin A., Lavrov A. A Method of Simultaneous Signals Spectrum Analysis for Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 18th Intern. Conf. NEW2AN 2018, and 11th Conf. ruSMART 2018, St. Petersburg, Russia, Proceedings. P. 200-209. DOI: [10.1007/978-3-030-01168-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_19).
8. Кондаков Д.В., Лавров А.П. Анализ работы цифрового многоканального широкополосного приёмника с субдискретизацией // XII всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: труды конф., М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2018. С. 253-257.

**Для цитирования:**

Д.В.Кондаков, А.П.Лавров. Анализ работы цифрового многоканального широкополосного приёмника с субдискретизацией. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/5/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.5