

ДЕТЕКТОР ЧАСТОТЫ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ  
МОДУЛЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ© 2020 г. В. В. Леонидов<sup>а</sup> \*, И. Б. Гуляев<sup>а</sup>, Г. С. Колчин<sup>а</sup><sup>а</sup>НПП “Пульсар”,

Окружной проезд, 27, Москва, 105187 Российская Федерация

\*E-mail: leonidov@pulsarnpp.ru

Поступила в редакцию 16.07.2018 г.

После доработки 13.08.2018 г.

Принята к публикации 10.09.2018 г.

Обозначена необходимость определения текущей рабочей частоты в передающих модулях радиолокационных систем. Разработан детектор частоты и произведено его моделирование, спроектированы его основные элементы: делитель мощности и микрополосковые фильтры. Определены основные критерии, которым должны соответствовать фильтры. По результатам моделирования разработан макетный образец детектора частоты, проведено его практическое исследование.

DOI: 10.31857/S0033849420020126

## ВВЕДЕНИЕ

Современные твердотельные передающие модули для радиолокационных систем оснащены цифровыми системами управления и функционального контроля. Одной из задач в ходе функционального контроля является измерение и индикация уровня входной и выходной мощности передатчика, что позволяет сделать выводы о работоспособности радиолокационной системы, а также выявить деградацию передающего тракта. Как правило, контроль уровня мощности в составе передатчика осуществляется посредством диодного детектора, характеристика которого имеет температурную и частотную зависимость. Для температурной корректировки используется датчик температуры, корректировка по частоте становится возможной благодаря детектору частоты, который рассматривается в данной работе.

Также значение текущей рабочей частоты необходимо знать для корректировки амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) передатчика посредством систем автоматического регулирования усиления [1].

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА  
ДЕТЕКТОРА ЧАСТОТЫ

Структурная схема детектора частоты представлена на рис. 1. Детектор частоты состоит из делителя мощности, разделяющего входной сигнал на два канала, в каждом из которых установлен фильтр. АЧХ фильтра в первом канале (Ф1) должна монотонно убывать, фильтра во втором канале (Ф2) – монотонно возрастать в рабочей полосе частот передатчика. Сигналы с фильтров поступают на диодные детекторы, а затем, после

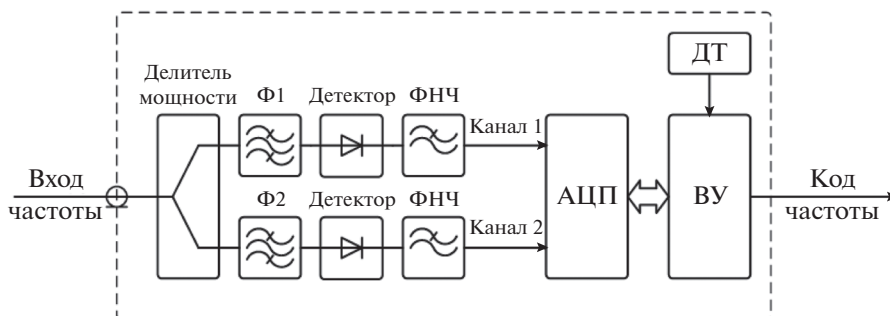


Рис. 1. Структурная схема детектора частоты: АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ДТ – датчик температуры, ВУ – вычислительное устройство, ФНЧ – фильтр низких частот, Ф1 и Ф2 – полосовые фильтры.

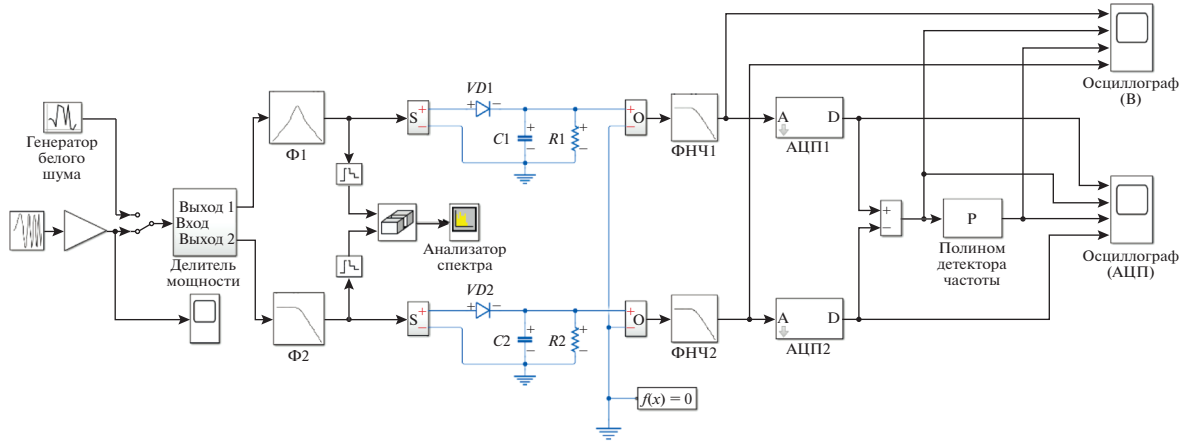


Рис. 2. Схема детектора частоты, смоделированная в программе Matlab Simulink.

фильтров нижних частот (ФНЧ), на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Вычислительное устройство (ВУ) по соотношению сигналов на первом и втором канале АЦП рассчитывает текущую рабочую частоту. Датчик температуры (ДТ) необходим для температурной коррективы характеристик детекторов. В качестве ВУ мо-

жет выступать микроконтроллер или программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС).

В данной статье будет рассмотрен детектор частоты для передающих модулей систем управления воздушным движением, диапазон рабочих частот: 2.7...2.9 ГГц.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ЧАСТОТЫ

Моделирование детектора частоты производилось с помощью программного пакета Matlab Simulink. На рис. 2 представлена модель Matlab Simulink детектора частоты. Генератор формирует синусоидальный сигнал с линейно изменяющейся частотой от 2.7 до 2.9 ГГц, который посредством делителя мощности разделяется на два плеча, в каждом из них установлен фильтр и диодный детектор. Сигналы с диодных детекторов после фильтров нижних частот с помощью АЦП преобразуются в цифровой код, затем производится вычисление их разности. Полином детектора частоты преобразует значение разности в код частоты. Из результатов моделирования (рис. 3) видно, что значение сигнала на выходе детектора довольно точно совпадает с частотой входного сигнала, что свидетельствует о работоспособности предложенного алгоритма. Однако есть ограничение: входной сигнал для детектора частоты должен поступать с выхода усилителя, находящегося в режиме глубокого насыщения, чтобы уровень мощности детектируемого сигнала не влиял на результат.

Следующим этапом является проектирование и моделирование СВЧ-тракта, состоящего из делителя мощности, фильтров и детекторов мощности. В данной работе для этого был использован программный пакет Microwave Office.

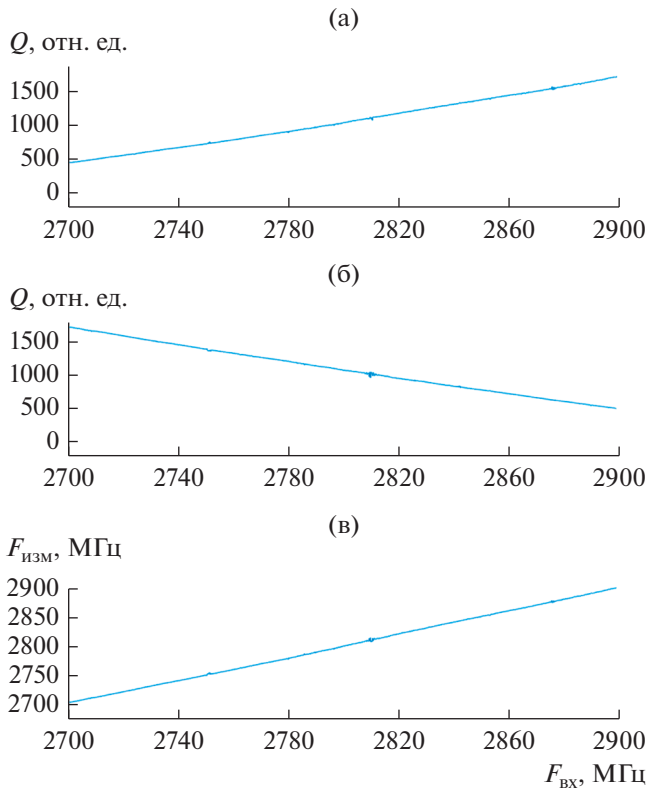


Рис. 3. Смоделированная зависимость выходного значения АЦП1 (а) и АЦП2 (б) и выхода детектора частоты (в) от входной частоты  $F_{вх}$  ( $Q$  – квант АЦП,  $F_{изм}$  – измеренное значение частоты).

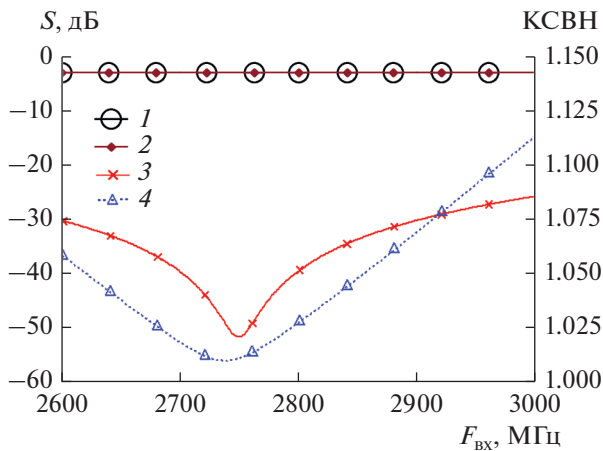


Рис. 4. Результаты моделирования делителя мощности:  $S_{21}$  (1),  $S_{31}$  (2),  $S_{32}$  (3),  $S_{11}$  (4) в зависимости от входной частоты  $F_{\text{вх}}$ .

### 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-ТРАКТА

В качестве материала печатной платы СВЧ-тракта детектора выбран Rogers RO4003 толщиной 0.818 мм с толщиной фольги 18 мкм.

На первом этапе был разработан делитель мощности, в качестве которого выбран мост Уилкинсона, представляющий собой два четверть-волновых микрополоска, соединенные активным сопротивлением [2].

Результаты моделирования разработанного делителя мощности представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, в рабочем диапазоне частот развязка между плечами делителя  $S_{32}$  получилась более 30 дБ, коэффициент стоячей волны (КСВН) входа  $S_{11}$  — не выше 1.1, а прямые потери в обоих плечах ( $S_{21}$  и  $S_{31}$ ) практически совпадают и составляют порядка 3 дБ.

На следующем этапе проектировали фильтры  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  для каждого из плеч делителя, которые должны удовлетворять критериям:

- 1) в рабочей полосе частот АЧХ фильтра  $\Phi 1$  должна монотонно убывать, а  $\Phi 2$  — монотонно возрастать;
- 2) точка пересечения АЧХ фильтров  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  должна быть приближена к центральной частоте рабочего диапазона;
- 3) коэффициент передачи каждого из фильтров на нижней частоте рабочего диапазона должен отличаться от коэффициента передачи на верхней частоте рабочего диапазона на величину порядка 10 дБ;
- 4) габариты фильтров должны быть минимальными.

Исходя из критерия 4 в качестве фильтра  $\Phi 1$  выбран фильтр нижних частот на элементах с распределенными параметрами, в качестве фильтра

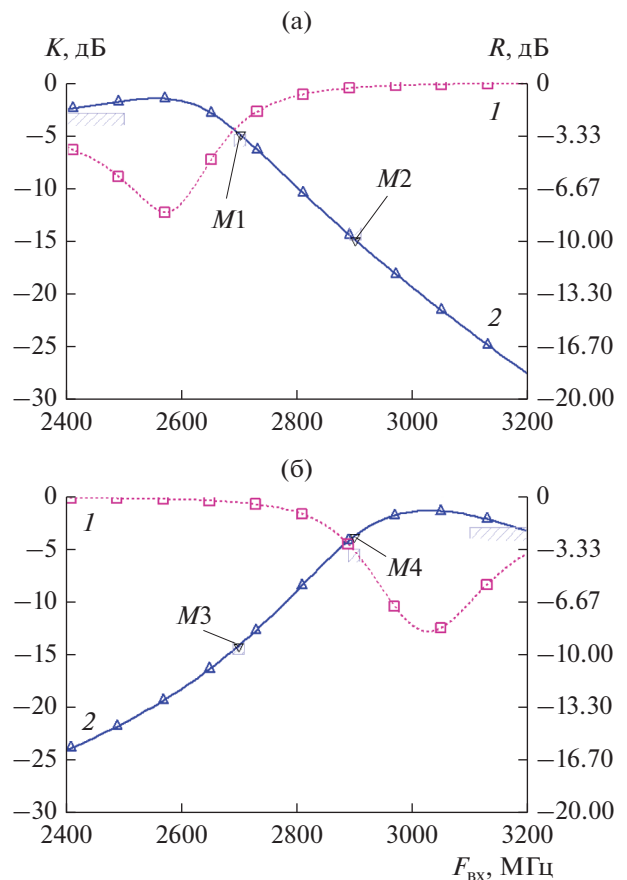


Рис. 5. Результаты моделирования фильтра  $\Phi 1$  (а) и  $\Phi 2$  (б): коэффициенты передачи  $K$  между выходом и входом (1), обратные потери  $R$  между выходом и входом (2) в зависимости от входной частоты  $F_{\text{вх}}$ ; M1:  $K = -5.0$  дБ при  $F_{\text{вх}} = 2700$  МГц; M2:  $K = -14.9$  дБ при  $F_{\text{вх}} = 2900$  МГц; M3:  $K = -14.2$  дБ при  $F_{\text{вх}} = 2700$  МГц; M4:  $K = -3.8$  дБ при  $F_{\text{вх}} = 2900$  МГц.

$\Phi 2$  — полосовой фильтр на базе шпилечных резонаторов [3]. При моделировании проведена оптимизация топологии фильтров согласно критериям 2 и 3. На рис. 5а и 5б представлены результаты моделирования фильтров, которые полностью удовлетворяют обозначенным выше критериям.

На рис. 6 представлена схема детектора частоты, в состав которого входят детекторные диоды  $VD1$  и  $VD2$ , фильтрующие конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , нагрузочные резисторы  $R1$  и  $R2$ , а также разработанные ранее делитель мощности и фильтры. На рис. 7а представлены графики  $S$ -параметров СВЧ-тракта, на рис. 7б — зависимость напряжения на выходе детекторов от входной частоты. Как видно из графиков, значение текущей входной частоты можно рассчитать, измеряя напряжение на каждом из каналов детектора частоты.

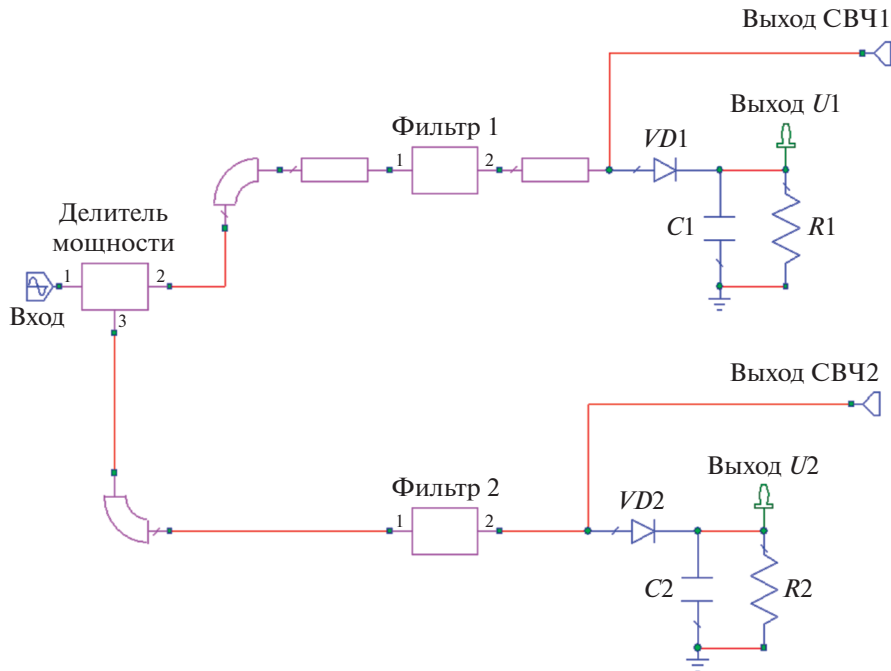


Рис. 6. Модель детектора частоты.

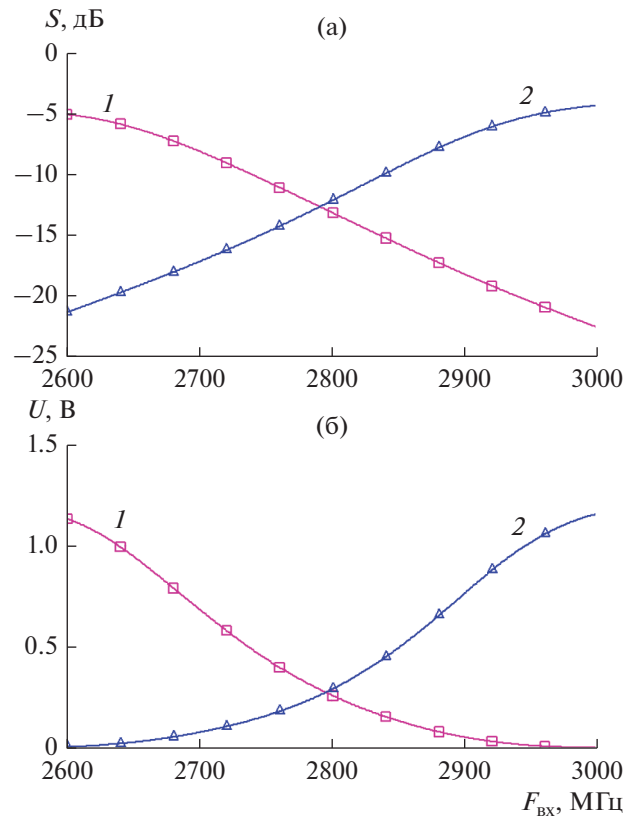


Рис. 7. S-параметры модели детектора частоты: (а) коэффициент передачи между выходом СВЧ1 и входом  $S_{21}$  (1), коэффициент передачи между выходом СВЧ2 и входом  $S_{31}$  (2), а также выходные напряжения  $U$  с выходов напряжения  $U_1$  и  $U_2$  (б) в зависимости от частоты  $F_{вх}$ .

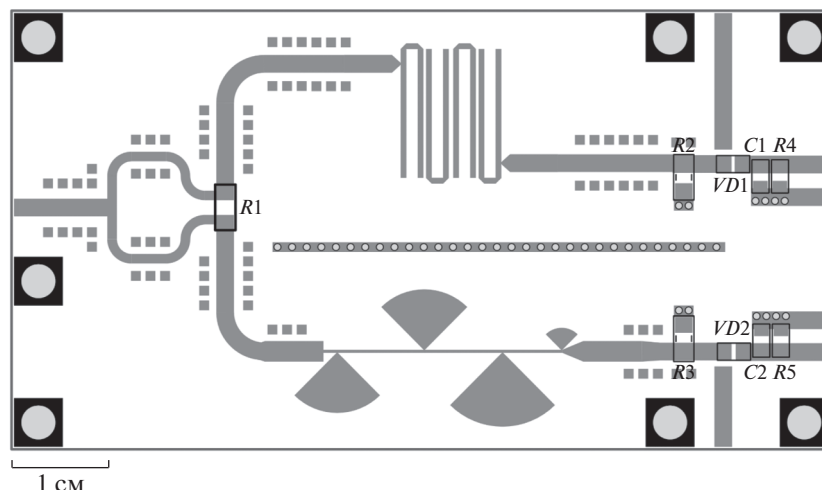


Рис. 8. Топология печатной платы детектора частоты.

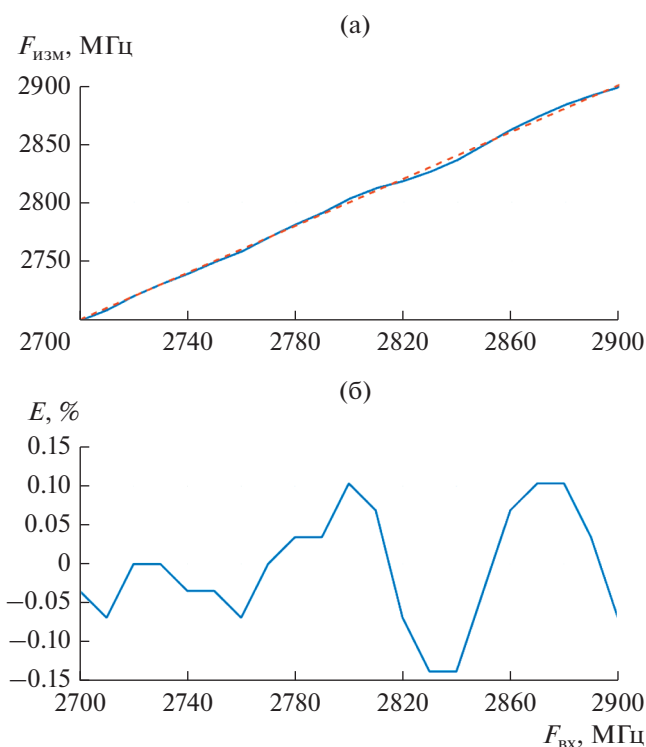


Рис. 9. Полученная (сплошная линия) и идеальная (пунктирная) выходные характеристики  $F_{\text{изм}}$  (а) и график ошибки  $E$  (б) в зависимости от частоты  $F_{\text{вх}}$ .

#### 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

По результатам моделирования была разработана печатная плата СВЧ-тракта (рис. 8). В качестве вычислительного устройства использовался ARM-микроконтроллер (МК) на базе ядра Cortex-M3 с двумя встроенными АЦП. Разработано программное обеспечение для микроконтроллера, реализующее алгоритм, предложенный в разд. 2. Передача информации о текущей входной частоте осуществлялась посредством модуля UART.

С выхода СВЧ-генератора на вход детектора частоты подавался сигнал в диапазоне от 2.7 до 2.9 ГГц с шагом 10 МГц, были зарегистрированы характеристики каждого из выходов детектора. Далее проведена аппроксимация полученных данных полиномами второго порядка, коэффициенты которых записаны в энергонезависимую память МК. На рис. 9а представлен график, демонстрирующий отклонение измеренного значения частоты от входного. Как видно из рисунка 9б,

максимальная ошибка определения частоты составляет не более 0.2%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный детектор частоты позволяет измерить значение частоты в заданном диапазоне с точностью не хуже 0.2%. Это дает возможность корректировать частотно зависимые параметры телеметрии передающих модулей радиолокационных систем, а также корректировать АЧХ при использовании цифровой системы автоматического регулирования усиления. Быстродействие данной системы зависит в первую очередь от частоты дискретизации АЦП и быстродействия ВУ, для большинства задач достаточно до  $10^6$  отсчетов в секунду.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонидов В.В., Гуляев И.Б., Колчин Г.С.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 7. С.758
2. *Wilkinson E.J.* // IRE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1960. V. 8. № 1. P. 116.
3. *Hong Jia-Sheng, Lancaster M.J.* Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. N.Y.: John Wiley and Sons, 2001.
4. Справочник по радиолокации / Пер. с англ. под ред. Скольника М.И., М.: Техносфера, 2014. Кн. 1.
5. *Vlasov A.I., Demin A.A.* // Proc. 13th Central & Eastern European Software Engineering Conf. St. Petersburg. 20–21 Oct. 2017. N.Y.: Association of Computing Machinery, 2017. Article № 4.  
<https://doi.org/10.1145/3166094.3166098>