

УДК 621.375.029

## УСИЛИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ АКТИВНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ NAVSTAR И ГЛОНАСС

И.Ю. МАЛЕВИЧ, Е.Н. КАЛЕНКОВИЧ, М.И. КРЮЧКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 9 сентября 2013*

Приведены результаты разработки и лабораторных испытаний технологичного маломощного транзисторного усилительного модуля с питанием по радиочастотному кабелю для активной приемной антенны спутниковых систем навигации NAVSTAR и ГЛОНАСС.

*Ключевые слова:* маломощный усилитель, активная антенна, прием сигналов спутниковых навигационных систем NAVSTAR и ГЛОНАСС.

### Введение

Актуальность задачи разработки новых конструкций и оборудования для приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов определяется высокой востребованностью таких систем. Активная антенна, представляющая комбинацию антенного элемента и усилительного модуля, является первым элементом в радиочастотном тракте приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов, поэтому ее характеристики в значительной мере определяют надежность работы аппаратуры потребителей. Высокая чувствительность, большой динамический диапазон, низковольтное питание по радиочастотному кабелю формируют особые подходы к построению маломощных усилительных модулей (МУМ) активных антенн для приема сигналов спутниковых систем навигации.

В подавляющем большинстве конструкций вопрос практической реализации усилительного модуля активной антенны для приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов решается посредством использования интегральных усилителей [1–3]. Однако такой подход формирует исключительную зависимость проектных решений от производителей и поставщиков соответствующих комплектующих изделий. Сложно также планировать долгосрочную перспективу выпуска изделия. Изменение корпусного исполнения интегрального модуля тоже создает серьезные трудности, поскольку требуется переработка топологии изделия. Кроме этого, тенденции микроминиатюризации интегральных усилителей для масштабирования сигналов спутниковых систем навигации (например, 6-выводной корпус ВГУ7007 имеет размеры 1,45×1,0×0,5 мм [4], а корпус МАХ2687 – 0,86×0,86×0,65 мм [5]), препятствуют возможностям лабораторного макетирования, оптимизации режимов работы модулей и отработки новых технических решений устройства.

Одним из подходов, решающих задачу разработки новых конструкций усилительных модулей активных антенн для приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов, является схемотехнический синтез в базисе транзисторных структур.

## Особенности функционирования усилительного модуля в составе активной антенны для приема сигналов спутниковых систем навигации

Структура активной антенны для приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов представляет цепочечное соединение принимающего спирального либо микрополоскового на керамической подложке антенного элемента, ПАВ-фильтра (либо фильтров), осуществляющего предварительную селекцию сигналов навигационных спутников, и широкополосного малошумящего усилительного модуля. Питание МУМ и активных цепей управления режимами работы антенны производится по радиочастотному кабелю от унифицированного источника напряжением 2,5...3,3 В, расположенного в приемнике сигналов спутниковых радионавигационных систем (рис. 1).

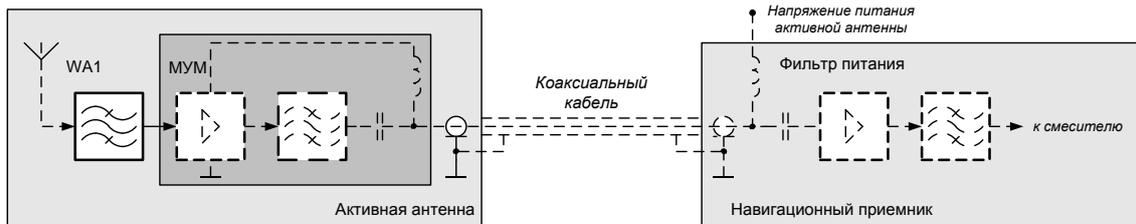


Рис. 1. Система усилительного модуля активной антенны

Усилительные модули современных активных антенн обычно работают в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом и обеспечивают в рабочем диапазоне частот 1570...1625 МГц коэффициент усиления порядка 20...30 дБ и коэффициент шума не более 2,5 дБ [6].

В дополнение к этому, производители малошумящих усилителей заявляют о дополнительных функциях. Так, например, NXP Semiconductors выпускает на базе технологии SiGe:C малошумящие усилители семейства NXP BGU700x с возможностью адаптивного смещения, позволяющего за счет увеличения тока улучшать параметр  $IP3$  на 10 дБ для помех с уровнями от  $-40$  дБм до  $-20$  дБм, и компенсировать таким образом влияние мощных сигналов передатчиков сотовой связи, интерфейса Bluetooth и беспроводных сетей гарантируя при этом наилучший прием слабых сигналов спутниковой навигации (коэффициент шума остается ниже 1 дБ) [4]. Отмечается также, что для создания конечного изделия каждому устройству серии BGU700x/BGU8007 требуется только одна индуктивность для согласования входного сигнала и один конденсатор для развязки питания. Малошумящие усилители фирмы MAXIM, спроектированные по улучшенному MAXIM SiGe процессу, обладают функцией отключения модуля, что позволяет уменьшить ток потребления устройства до величин, менее 10 мкА [5].

Однако такие функции интегральных усилителей в полной мере реализуются только при комплексировании с патч-антеннами. При разработке выносных активных антенн система питания по радиочастотному кабелю значительно усложняет конструкцию. Также затрудняется либо становится вовсе невозможным управление режимами работы интегральной структуры.

### Схемотехнический синтез усилительного модуля в базе транзисторных структур

Проблема синтеза технического решения МУМ для активной антенны, принимающей сигналы спутниковых систем навигации, заключается в поиске компромиссного решения с точки зрения выполнения требований по назначению и возможностью современной элементной базы обеспечить заданные технические характеристики устройства. Немаловажное значение имеют стоимость и технологичность изделия.

Ключевой характеристикой усилительного модуля является динамический диапазон в рабочем диапазоне частот, оцениваемый точкой компрессии ( $P_{-1дБ}$ ) не ниже  $-20$  дБм и коэффициентом шума ( $NF$ ) не выше 2,5 дБ.

На рис. 2 приведены возможные схемотехнические решения усилительного модуля с фидерным питанием, которые могут быть применимы в качестве базовых. Каждая из них выполнена на биполярных транзисторах с граничной частотой 8...14 ГГц, что обеспечивает упрощенное схемно-топологическое исполнение модулей, гарантирует значение коэффициента шума не выше 2,5 дБ и высокую воспроизводимость характеристик усилителей.

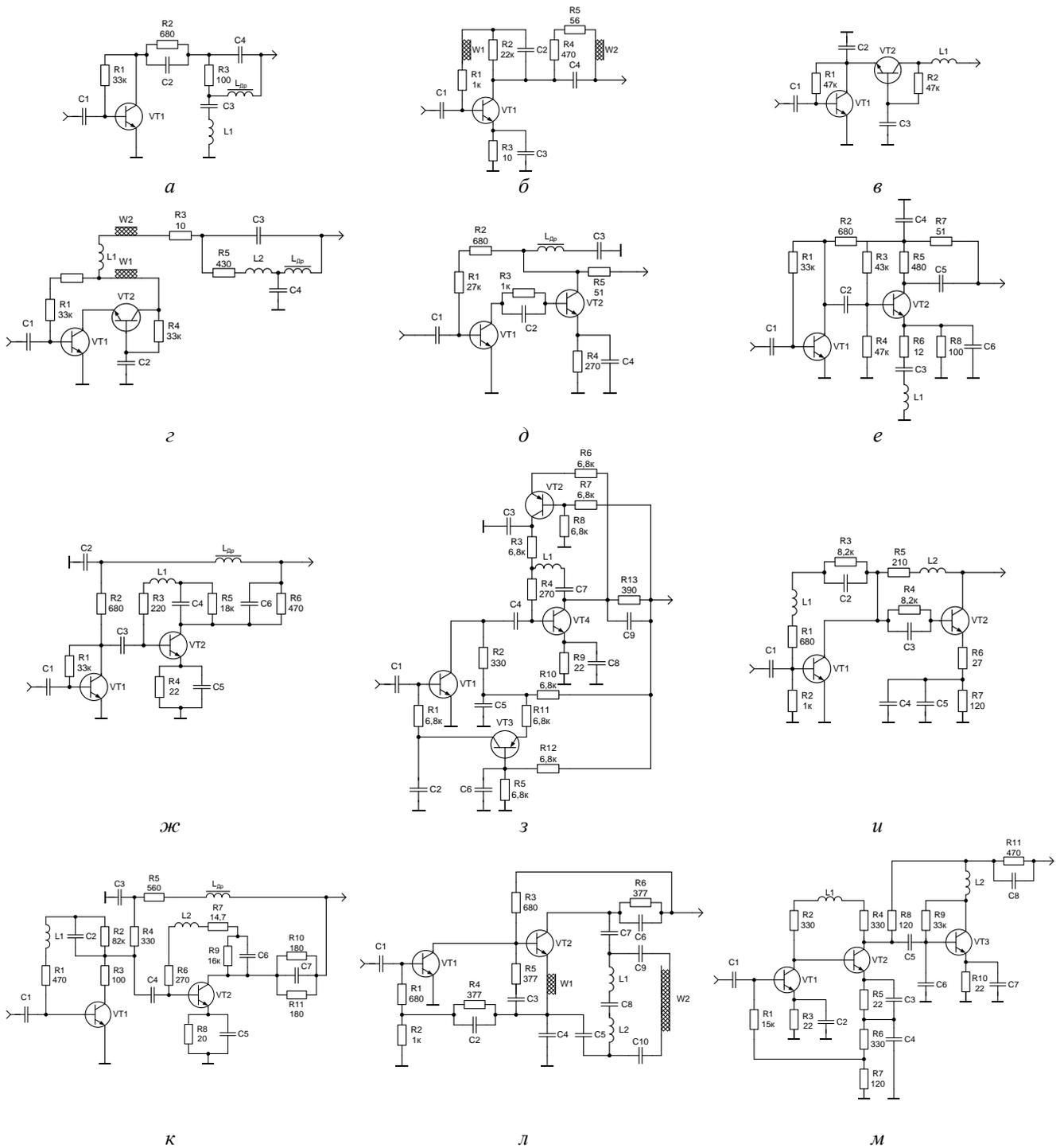


Рис. 2. Схмотехнические решения усилительных модулей с фидерным питанием

Схемы с одиночным транзистором VT1 (рис. 2, а, б) способны обеспечить коэффициент усиления 8...12 дБ. При этом согласование с трактом в полосе рабочих частот во входном сечении производится посредством оптимизации режима по постоянному току, а в выходном – посредством корректирующих цепочек. Каскадное соединение транзисторов VT1 и VT2 (рис. 2, в, з) обеспечивает высокую однонаправленность активной ячейки и позволяет получить большую широкополосность модуля вследствие уменьшения влияния эффекта Миллера. Здесь коэффициент передачи (15...22 дБ) и присоединительные параметры схемы задаются режимно фиксированным током базы. Передаточная характеристика модуля в области высоких частот регулируется индуктивностью L1. Коэффициент шума не превышает 1,7 дБ, точка компрессии –25...–22 дБм.

В схемах с последовательным соединением аperiodических каскадов на транзисторах VT1 и VT2, включенных с общим эмиттером (рис. 2, *д, е*), активная ячейка позволяет реализовать коэффициент усиления до 25 дБ, коэффициент шума на уровне 1,5...1,8 дБ и  $P_{-1дБ} = -27...-20$  дБм. Структура модуля с двумя ступенями усиления дает возможность обеспечить раздельную покаскадную оптимизацию передаточных характеристик, режимов согласования и параметров динамического диапазона звеньев активной ячейки.

В схемах рис. 2, *ж, з* использование в качестве выходного каскада структуры с последовательно-параллельной комплексной обратной связью позволяет стабилизировать коэффициент передачи усилительного модуля в широком частотном диапазоне на уровне 20...30 дБ. Каскады развязаны по постоянному току за счет системы раздельного питания VT1 и VT2.

Активная ячейка с цепочечным соединением согласованных каскадов (рис. 2, *и, к*), выполненных на транзисторах VT1 и VT2, охваченных местными комплексными комбинированными обратными связями, обеспечивает широкополосную стабилизацию функционально-энергетических характеристик усилительного модуля в диапазоне 1,5...2 декады, коэффициент шума на уровне 1,8...2,5 дБ и  $P_{-1дБ}$  не ниже  $-17...-12$  дБм.

Использование общей параллельной обратной связи по току, охватывающей два каскада (рис. 2, *л, м*), позволяет существенно улучшить стабильность режимов работы VT1 и VT2 по постоянному току, понизив при этом коэффициент шума структуры до 1,5...1,8 дБ и сохранив высокое значение  $P_{-1дБ}$  на уровне  $-17...-10$  дБм.

Сравнительный анализ технических решений усилителей с фидерным питанием показывает, что в качестве базовой структуры при проектировании усилительного модуля активной антенны для приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов целесообразно выбрать двухкаскадную схему с общей параллельной обратной связью по току. При этом тип транзистора и режим работы входной усилительной секции выбираются исходя из требуемого значения коэффициента шума устройства. Выходная ступень определяет нагрузочную способность модуля и баланс порогов перегрузки в структуре. Для создания в звеньях модуля дополнительного запаса по усилению целесообразно использовать местные реактивные параллельные положительные обратные связи по току и корректирующую индуктивность в коллекторной цепи VT1.

С учетом изложенного схема усилительного модуля с питанием по радиочастотному кабелю для активной приемной антенны спутниковых систем навигации имеет вид, представленный на рис. 3.

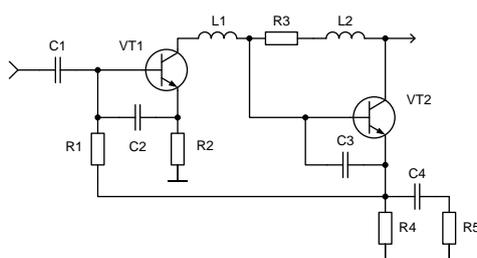


Рис. 3. Схема усилительного модуля с фидерным питанием для активной приемной антенны спутниковых систем навигации

Принятые антенным элементом NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналы через разделительную емкость C1 подводятся к базе транзистора VT1, режим работы которого по постоянному току подбирается эмиттерным резистором R2 из условия обеспечения заданных параметров динамического диапазона усилительного модуля. Индуктивность L1 номиналом 10...15 нГн позволяет оптимизировать передаточную характеристику каскада для используемого типа транзистора. Выходной каскад модуля выполнен по схеме с местными последовательно-параллельными комплексными обратными связями (R3, R4, R5, C4, L2). Режим работы VT2 задается резистором R4 с учетом необходимого порога перегрузки. Стабилизация функционально-энергетических характеристик модуля обеспечивается общей параллельной обратной связью по току (R1). Местные реактивные положительные обратные связи (C2 и C3) позволяют повысить петлевой коэффициент усиления и скорректировать передаточную

характеристику модуля в области высоких частот при смене типа активного элемента. Усиленный групповой сигнал с выхода модуля посредством радиочастотного кабеля подводится к входу приемника спутниковых радионавигационных систем, от которого, в свою очередь, в кабель через фильтр питания подается напряжение положительной полярности номиналом 2,5...3,3 В.

### Моделирование и экспериментальные исследования усилительного модуля

Оптимизация параметров обратных связей и цепей коррекции разработанного усилительного модуля выполнена с использованием пакета моделирования электронных схем Microcap 10. Результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики усилительного модуля, выполненного на СВЧ транзисторах различных типов при условии, что  $R1 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R3 = 320 \text{ Ом}$ ,  $R4 = 24 \text{ Ом}$ ,  $R5 = 8 \text{ Ом}$ ,  $L2 = 30 \text{ нГн}$ ,  $C2 = C3 = 1 \text{ пФ}$ , показаны на рис. 4.

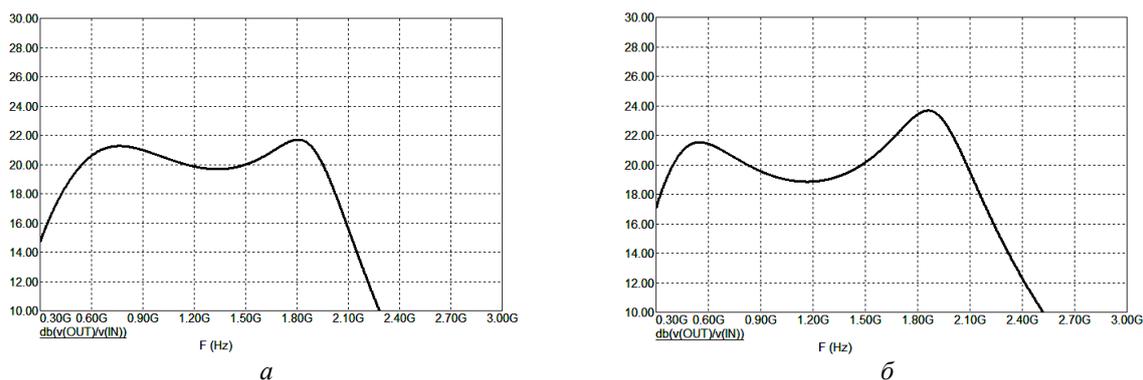


Рис. 4. Результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики разработанного усилительного модуля, выполненного на транзисторах AT-41586, AT-42086 (а) и BFG-310, AT-42086 (б)

Видно, что амплитудно-частотная характеристика усилительного модуля устойчива к изменению типа СВЧ транзистора, при этом отличие реализуемых коэффициентов передачи в диапазоне NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов не превышает 1 дБ.

Лабораторный макет усилительного модуля, выполненный поверхностным монтажом на транзисторах AT-41586 ( $f_T = 8 \text{ ГГц}$ ,  $NF_T = 1,7 \text{ дБ}$ ) и AT-42086 ( $f_T = 8 \text{ ГГц}$ ,  $NF_T = 2,2 \text{ дБ}$ ) с использованием SMD-компонентов, с подключенным радиочастотным кабелем RG-174 (погонное затухание 1,19 дБ/м) длиной 2,5 м и оконечным разъемом типа SMA-male, обеспечивает в 50 Ом тракте коэффициент передачи 20 дБ в диапазоне частот NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов, коэффициент шума 1,8 дБ, точку компрессии минус 15 дБм при токе потребления 40 мА от источника +3,2 В.

Результаты экспериментальных исследований разработанного усилительного модуля для исполнения на двух однотипных транзисторах (AT-41586) не выявили существенных отличий в передаточной характеристике устройства.

### Заключение

Таким образом, разработанный транзисторный модуль соответствует современным требованиям, предъявляемым к маломощным усилителям, функционирующим в составе выносных активных антенн для приема NAVSTAR и ГЛОНАСС сигналов. Увеличенный, сравнительно с известными конструкциями, динамический диапазон разработанного усилительного модуля, низкая стоимость, инвариантность к типу СВЧ транзистора и технологичность позволяют позиционировать его как перспективное конкурентоспособное импортозамещающее изделие.

# THE AMPLIFIER MODULE OF ACTIVE ANTENNA FOR RECEIVING SIGNALS SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS NAVSTAR AND GLONASS

I.Yu. MALEVICH, E.N. KALENKOVICH, M.I. KRUCHKOV

## Abstract

The result of development and laboratory testing low noise amplifier module for the receiving antenna of satellite navigation systems NAVSTAR / GLONASS with powered from the RF cable is described.

## Список литературы

1. *Kaplan E.D., Hegarty C.J.* Understanding GPS Principles and Applications. Boston, 2006.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М., 2010.
3. Global Positioning System directorate systems engineering & integration. Interface specification IS-GPS-200G. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Segment Interfaces. 2012.
4. RF Manual 16<sup>th</sup> edition. Application and design manual for High Performance RF products. Document order number 9397 750 17272. June 2012.
5. Maxim Integrated Products: GPS/GNSS Low-Noise Amplifiers 19-6040; Rev 1; 5/12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX2687-MAX2694.pdf>. – Дата доступа: 15.08.2013.
6. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н. Харисова, А.Ф. Перова, В.А. Болдина. М., 1998.