

УДК 621.375.4

А.А. Калентьев, И.М. Добуш, Л.И. Бабак, Д.В. Гарайс, А.Е. Горяинов

Автоматизированное проектирование монолитного малошумящего усилителя для приемника ГНСС на основе генетического алгоритма

Представлена разработка монолитного малошумящего усилителя (МШУ) диапазона частот 1,2–1,8 ГГц на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии для приемника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Проектирование МШУ выполнено с использованием программы синтеза согласующе-корректирующих цепей (СКЦ) gMatch, основанной на генетическом алгоритме (ГА). Приведено краткое описание подхода к структурно-параметрическому синтезу СКЦ на базе ГА. Рассмотрены возможности программы gMatch, основные этапы проектирования и характеристики усилителя.

Ключевые слова: ГНСС-приемник, малошумящий усилитель, pHEMT, согласующе-корректирующие цепи, синтез, генетический алгоритм.

Приемник глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) предназначен для определения пространственных координат, вектора скорости, текущего времени и других параметров, полученных в результате приема и обработки радиосигналов от навигационных спутников [1]. Современные приемники ГНСС являются достаточно сложными аналого-цифровыми устройствами. Важным их элементом являются внешние малошумящие усилители (МШУ), выполняемые в виде отдельной монолитной интегральной схемы (МИС). Такие МШУ могут использоваться для уменьшения влияния шумов и компенсации потерь в кабеле, соединяющем антенну с приемником (в этом случае усилитель располагается непосредственно вблизи антенны), а также в других компонентах устройства (антенные переключатели, радиочастотные фильтры и др.). Как правило, МШУ для приемников ГНСС должны обладать достаточно высоким уровнем коэффициента усиления (20 дБ и более), малым коэффициентом шума (ниже 1,5 дБ) и высокой линейностью ($P_{\text{out 1dB}}$ свыше 3–7 дБм). При этом предъявляются также требования к экономичности: работа при пониженном напряжении питания (1,5–3,5 В) и ток потребления не более 10 мА.

Разработка МШУ СВЧ-диапазона представляет собой сложную задачу, требующую значительных затрат времени и высокой квалификации проектировщика. При этом одной из главных проблем является проектирование согласующе-корректирующих цепей (СКЦ), которые осуществляют согласование усилителя с трактом передачи сигнала, выравнивание амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), а также должны рассчитываться из условий минимизации коэффициента шума, обеспечения устойчивости устройства и т.д. Распространенный графический подход к расчету СКЦ МШУ на основе круговой диаграммы Вольперта–Смита [2] в случае широкополосных цепей весьма трудоемок и не позволяет учесть весь комплекс указанных требований к усилителю. В работах [2–4] представлена интерактивная методика «визуального» проектирования СКЦ для широкополосных усилителей. По сравнению с подходом на основе круговой диаграммы она гораздо более эффективна, но также требует существенных затрат времени и наличия опыта разработчика.

Настоящая работа посвящена разработке МИС МШУ диапазона частот 1,2–1,8 ГГц для приемника ГНСС на базе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии. Проектирование согласующе-корректирующих цепей (СКЦ), входящих в состав усилителя, осуществлялось с использованием программы синтеза gMatch [5, 6], основанной на генетическом алгоритме (ГА) [7]. Программа вошла в состав интеллектуальной системы автоматизированного проектирования СВЧ устройств INDESYS [8,9] В работе представлены возможности программы gMatch, описаны основные этапы проектирования, приведены характеристики разработанной МИС МШУ.

Алгоритм синтеза СКЦ на основе ГА. Проектирование СКЦ является одним из важнейших этапов разработки СВЧ транзисторных усилителей, во многом определяющим их результирующие параметры. Рассмотрим кратко алгоритм синтеза СКЦ на базе ГА, реализованный в программе gMatch.

Задача состоит в синтезе реактивной четырехполюсной цепи, обеспечивающей необходимую частотную характеристику передачи мощности $G(\omega)$ от генератора в нагрузку. Требования к коэф-

фициенту передачи цепи представляются в виде ограничений, определяющих диапазон возможных значений $G(\omega)$ в выбранных точках ω_k ($k = \overline{1, m}$) рабочей полосы частот:

$$G^-(\omega_k) \leq G(\omega_k) \leq G^+(\omega_k), \quad k = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где $G^-(\omega_k)$ и $G^+(\omega_k)$ – граничные значения коэффициента передачи $G(\omega_k)$ на частоте ω_k .

Для получения практически приемлемых цепей при синтезе необходимо учесть ограничения на возможные типы и значения элементов в цепи, а также на структуру цепи.

Суть процедуры синтеза СКЦ на основе ГА следующая [5, 6]. СКЦ представляется в виде каскадного соединения звеньев, каждое из которых содержит один сосредоточенный элемент (R, L, C), последовательный или параллельный LC -контур либо один распределенный элемент (линия передачи, короткозамкнутый или холостой шлейф). Для осуществления структурного синтеза информация о схеме СКЦ должна быть представлена в виде двоичного кода – хромосомы (особи). При этом двоичными числами определенной длины кодируются способы включения, типы и значения элементов в звеньях СКЦ [6].

Каждому варианту СКЦ (хромосоме) соответствует некоторое значение целевой функции (ЦФ), в терминологии ГА – функции оценки или приспособленности. ГА обычно оперируют с совокупностью особей, которую называют популяцией. В нашем случае популяция – это фактически множество цепей, различающихся структурой и элементами. В процессе работы ГА популяция особей постепенно от шага к шагу обновляется. Для обновления популяции она дополняется новыми особями, в образовании которых участвуют члены текущего поколения. Генерация новых особей осуществляется путем имитации основных механизмов генетики, наблюдаемых в природе – кроссовера (скрещивания) и мутации.

Для поиска наилучших решений в ГА используется также заимствованный у природы механизм естественного отбора – селекция. Он реализуется таким образом, что хромосомы, имеющие лучшую функцию оценки, получают большую возможность участвовать в репродукции, чем «слабые» хромосомы. При отборе особей производится декодирование хромосомного набора и вычисление оценочной функции соответствующей цепи на основе моделирования ее электрических характеристик. В результате в процессе эволюции приспособленность особей от поколения к поколению будет возрастать, а значит, будут появляться все лучшие варианты.

При синтезе СКЦ на основе ГА сравнительно несложно учесть ограничения как на величины элементов, так и на структуру синтезированных цепей. Контроль значений элементов осуществляется путем указания минимальной и максимальной границ этих значений. Для контроля структуры цепи должна быть предусмотрена возможность задания допустимых типов ветвей (последовательная, параллельная) в каждом звене и допустимых типов элементов (или контуров) в каждой ветви. Подобный модифицированный ГА позволяет синтезировать практически реализуемые цепи, удобные также с точки зрения подачи напряжения питания на активный элемент, и т.д.

Таким образом, процесс синтеза цепи на основе ГА включает следующие этапы:

- 1) Задание числа элементов цепи, ограничений на структуру и параметры элементов.
- 2) Генерация случайным образом начального поколения особей.
- 3) Изменение популяции, в процессе которого образуются новые особи с лучшими значениями оценочных функций, а старые отбрасываются («умирают»).

Программа структурно-параметрического синтеза СКЦ и фильтров gMatch. Рассмотренный выше подход на основе ГА был реализован в программе структурно-параметрического синтеза СКЦ и фильтров gMatch [6]. Программа gMatch предназначена для автоматического проектирования четырехполюсных СКЦ, а также фильтров на сосредоточенных и распределенных элементах при резистивных или комплексных сопротивлениях генератора и нагрузки. Программа осуществляет структурный синтез (генерацию) нескольких вариантов схем цепей по требованиям на основе генетического алгоритма.

В качестве исходных данных могут быть указаны стандартная (плоская или наклонная) или произвольная форма частотной характеристики коэффициента передачи мощности цепи. Требования к частотной характеристике задаются в виде ограничений на значения коэффициента передачи в фиксированных частотных точках. Генератор и нагрузка могут быть представлены численными значениями импедансов на фиксированных частотах, эквивалентными цепочками, а также в виде коэффициентов полинома.

Программа позволяет синтезировать СКЦ в виде лестничных цепей любого порядка (число элементов цепи ограничено только временем синтеза). Могут быть синтезированы как реактивные цепи (содержащие элементы без потерь), так и диссипативные (содержащие резисторы). При этом в цепи

допускается использование последовательных и параллельных резонансных LC-контуров, реализующих вещественные нули передачи для улучшения избирательности и других характеристик цепи.

Одним из свойств генетических алгоритмов, на которых основана программа gMatch, является то, что они работают сразу с целым множеством решений. Таким образом, результатом работы программы является множество схем, из которых проектировщик может выбрать лучшее с учетом простоты реализации цепи, собственного опыта и неформальных критериев.

Важным преимуществом по сравнению с существующими алгоритмами и программами является возможность полного контроля структуры и величин элементов цепи. С этой целью пользователь задает допустимые границы значений элементов, а также ограничения на структуру синтезируемых цепей (количество элементов, возможность использования сосредоточенных или распределенных элементов, конкретные типы элементов, специальные требования к цепи для подачи напряжений питания на транзисторы через СКЦ, развязки по постоянному току и т.д.). Благодаря этому программа gMatch позволяет синтезировать цепи, удобные для практического использования.

Информация о полученных схемах СКЦ может быть передана в популярную систему автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ-устройств Microwave Office (MWO) фирмы AWR для дальнейшего использования, сохранена в виде файлов формата Touchstone, также есть возможность формирования файла текстового отчета, содержащего исходные данные и результаты синтеза.

Кроме того, программа gMatch может использоваться как «помощник» (Wizard) среды MWO, в этом случае обе программы интегрированы между собой [10]. В САПР MWO формируется схема СВЧ-устройства с «пустыми» подсхемами вместо СКЦ. В этой же программе рассчитываются значения импедансов генератора и нагрузки СКЦ на выбранных частотах, которые передаются в программу gMatch. После синтеза с помощью gMatch полученные цепи экспортируются в САПР MWO и включаются на местах «пустых» подсхем для моделирования полного устройства с СКЦ. Такая интеграция программных продуктов позволяет значительно ускорить, упростить и сделать более удобным процесс проектирования СВЧ-устройств [10].

Вычислительное ядро программы gMatch реализовано на языке программирования C++ для ускорения работы алгоритма синтеза. Для написания пользовательского интерфейса программы использован язык программирования C#, разработка велась в интегрированной среде Microsoft Visual Studio 2012.

Проектирование МШУ диапазона 1,2–1,8 ГГц с помощью программы gMatch. Монолитный усилитель выполняется на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии компании WIN Semiconductors (Тайвань). К его характеристикам предъявляются следующие требования: диапазон частот 1,2–1,8 ГГц; коэффициент усиления $G \geq 25$ дБ; неравномерность коэффициента усиления в полосе рабочих частот $\Delta G \leq \pm 0,5$ дБ; коэффициент шума $F \leq 1,5$ дБ; коэффициенты отражения на входе $|S_{11}| \leq -10$ дБ и выходе $|S_{22}| \leq -10$ дБ.

Для использования в усилителе выбраны pHEMT-транзисторы с шириной затвора $W_g = 4 \times 100$ мкм. Такой транзистор на частоте 1,8 ГГц имеет минимальный коэффициент шума $F_{\min} \approx 0,15$ дБ и максимальный коэффициент усиления $G_{\max} \approx 21$ дБ ($V_{ds} = 3$ В, $I_{ds} = 5$ мА). В рабочей полосе частот 1,2–1,8 ГГц и в широком частотном диапазоне вне этой полосы транзистор является потенциально неустойчивым прибором (коэффициент устойчивости $k < 1$).

С учетом усилительных возможностей транзистора и требований к общему коэффициенту усиления усилителя число усилительных каскадов выбрано равным двум. Выбранная структурная схема двухкаскадного МШУ показана на рис. 1. Для улучшения характеристик в усилителе применены цепи обратной связи (ОС). В частности, использование в первом каскаде последовательной ОС (L_{s1}) в цепи истока транзистора T_1 позволяет сблизить условия согласования по шуму и сигналу, а также повысить устойчивость каскада [11]. Второй каскад содержит, помимо цепи последовательной ОС (L_{s2}), также цепь параллельной ОС (Z_p) для выравнивания коэффициента усиления и обеспечения согласования на входе и выходе транзистора T_2 . В цепи стока транзистора T_2 используется индуктивность L_{d2} для компенсации задержки сигнала в цепи параллельной ОС.

Выбор структуры цепи параллельной ОС (Z_p) и величин индуктивностей L_{s1} , L_{s2} и L_{d2} осуществлялся на основе моделирования характеристик усилительных элементов совместно с этими цепями в САПР MWO. Входная, межкаскадная и выходная СКЦ (см. рис. 1) синтезированы с использованием программы gMatch, при этом использованы возможности непосредственной интеграции gMatch с продуктом MWO. При синтезе были заданы следующие ограничения на состав и значения элементов СКЦ: во всех цепях используются реактивные сосредоточенные элементы; в связи с использованием монолитной технологии величины емкостей и индуктивностей не должны превышать 10 пФ и 15 нГн соответственно. Синтез СКЦ осуществлялся с использованием моделей иде-

альных емкостей и индуктивностей, не учитывающих потери и паразитные параметры элементов. Это допустимо в связи с не очень высокими рабочими частотами усилителя, принимая во внимание также то, что на конечной стадии будет выполнена оптимизация характеристик МИС МШУ с использованием моделей реальных монокристаллических элементов. Ограничения на коэффициент передачи СКЦ задавались в диапазоне частот 1,2–1,8 ГГц на фиксированных точках с шагом 0,1 ГГц.

Проектирование усилителя выполнялось в следующем порядке. Вначале была выбрана величина индуктивности L_{s1} в цепи истока транзистора T_1 таким образом, чтобы значения импеданса источника сигнала ($Z_S^{(1)}$) для получения минимального коэффициента шума первого каскада ($Z_S^{(1)} = Z_{Sn}^{(1)}$, где $Z_{Sn}^{(1)}$ – оптимальный импеданс генератора, соответствующий минимуму коэффициента шума), и согласования на входе каскада ($Z_S^{(1)} = Z_{in}^{(1)*}$) в рабочей полосе частот оказались близки. В этом случае при проектировании входной реактивной СКЦ на минимум коэффициента шума одновременно будет достигнуто согласование на входе усилителя.

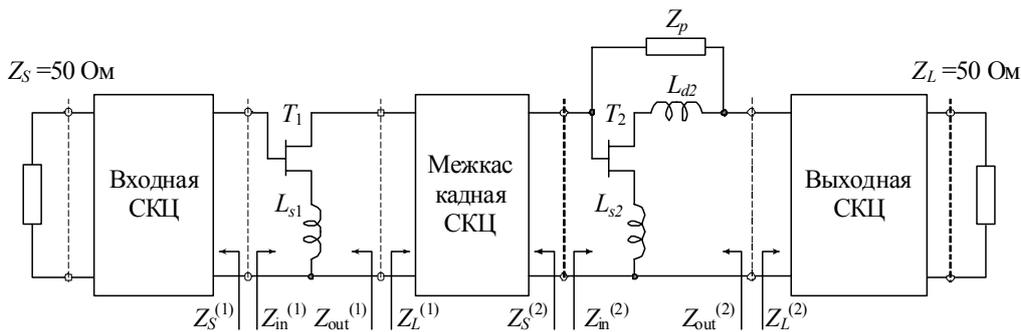


Рис. 1. Структурная схема двухкаскадного МШУ

Далее синтезируется входная СКЦ из условия обеспечения минимального коэффициента шума первого каскада. Для этого в САПР MWO сформирована схема, содержащая транзистор T_1 с индуктивностью L_{s1} , в ней в виде «пустой» подсхемы («черного ящика») указано также место синтезируемой СКЦ (рис. 2, а). В диалоговой форме программы gMatch (рис. 2, б) вводится имя сформированной общей схемы в пакете MWO и выбирается опция Noise matching. В результате СКЦ в рабочей полосе частот будет согласовывать импеданс стандартного тракта 50 Ом с комплексносопряженной величиной оптимального по шуму импеданса $Z_{Sn}^{(1)*}$ (или, что то же самое, будет трансформировать импеданс стандартного тракта в импеданс, близкий к $Z_{Sn}^{(1)}$).

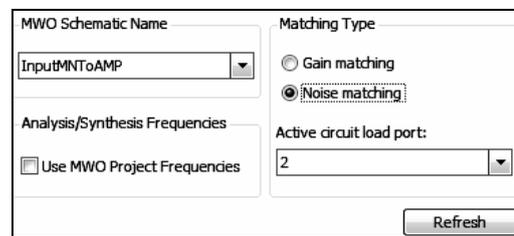
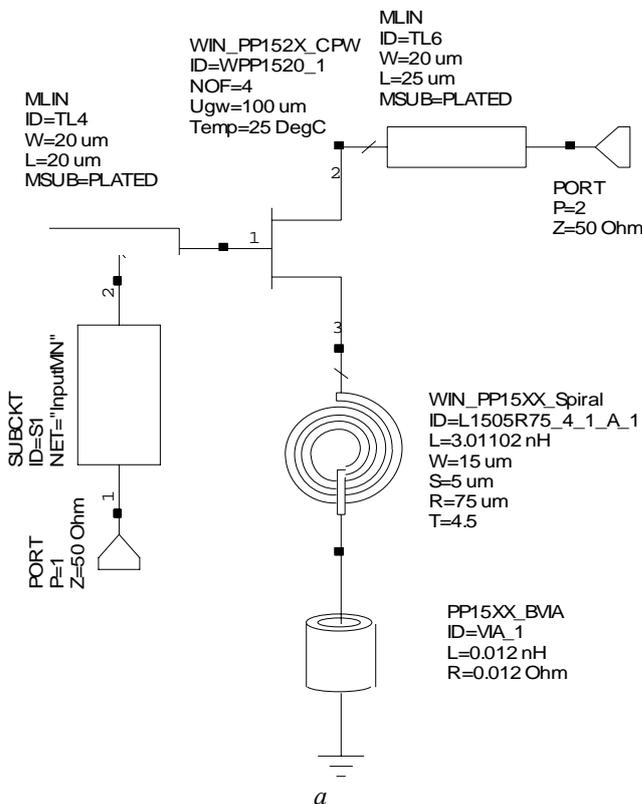


Рис. 2. Схема в САПР MWO с транзистором T_1 и «пустой» подсхемой (а) и настройка синтеза входной СКЦ на минимум коэффициента шума в программе gMatch (б)

При синтезе предъявлялись следующие требования к структуре входной СКЦ: должны быть обеспечены подача напряжения смещения через СКЦ на затвор первого транзистора, а также развязка входа усилителя по постоянному току.

Необходимое число элементов СКЦ n и требования к коэффициенту передачи цепи по мощности G_T выбирались путем проб. При числе элементов $n = 2$ и ограничениях в рабочей полосе частот $2 \text{ дБ} < G_T < 0 \text{ дБ}$ в программе gMatch было получено одно схемное решение, время синтеза СКЦ составило 13 с (при более строгих ограничениях на G_T не удалось добиться решения задачи). Структура полученной СКЦ и частотная характеристика её коэффициента передачи показаны на рис. 3. В диапазоне частот 1,2–1,8 ГГц минимальный коэффициент передачи цепи (при нагрузке Z_{Sn1}^*) равен $G_{T\min} = 0,5672$ (–2,46 дБ); неравномерность коэффициента передачи $\Delta G_T = 0,105$ (0,69 дБ); максимальный коэффициент отражения $|S|_{\max} = 0,658$ (здесь неравномерность АЧХ вычисляется по формуле $\Delta G_T = (G_{T\max} - G_{T\min})/2$). Как видно, из-за небольшого количества элементов качество согласования и соответственно точность трансформации импеданса к значению Z_{Sn1} в заданной полосе частот с помощью такой цепи не очень высокие.

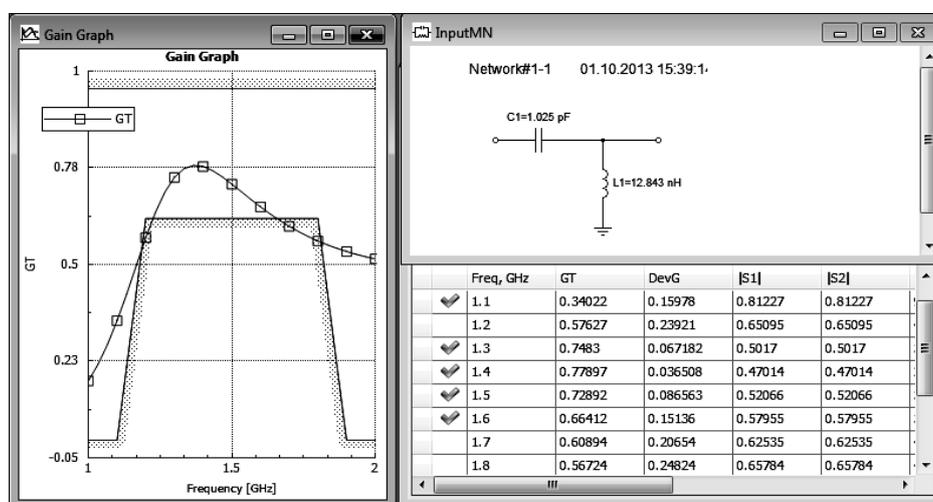


Рис. 3. Двухэлементная входная СКЦ и частотная зависимость коэффициента передачи полученной схемы в программе gMatch

При числе элементов цепи $n = 3$ и расширении диапазона варьирования величины индуктивностей (свыше 15 нГн) с помощью программы gMatch можно получить СКЦ, удовлетворяющую более жестким ограничениям: $-0,5 \text{ дБ} < G_T < 0 \text{ дБ}$. Однако полученное значение индуктивности в такой цепи слишком велико для монолитного исполнения.

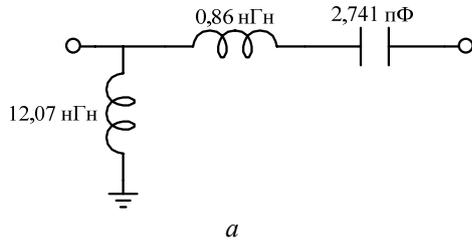
Заметим, что синтезированная цепь экспортируется в САПР MWO и непосредственно включается в ранее сформированную схему на рис. 2, а вместо «пустой» подсхемы. Таким образом, в пакете MWO можно сразу моделировать характеристики СКЦ при реальных нагрузках либо характеристики всей схемы с подключенной СКЦ.

Таким образом, для использования в качестве входной СКЦ усилителя выбрана двухэлементная цепь. Улучшение коэффициента шума и согласования на входе усилителя может быть достигнуто в дальнейшем путем оптимизации полной схемы всего усилителя.

На следующем шаге было выполнено проектирование второго усилительного каскада совместно с цепями ОС. В соответствии с распространенным схемным решением в качестве цепи параллельной ОС (Z_p) была выбрана последовательная RC-цепочка. После подключения ее и индуктивностей L_{S2} , L_{d2} к транзистору T_2 значения элементов всех указанных цепей были найдены с помощью оптимизатора, имеющегося в САПР MWO. При этом в качестве целей оптимизации использовались равномерность АЧХ и удовлетворительное согласование на входе и выходе усилительного каскада.

Затем проведен синтез выходной СКЦ усилителя, которая должна обеспечить согласование выходного импеданса оконечного каскада $Z_{\text{out}}^{(2)}$ с трактом передачи сигнала (50 Ом). В системе MWO формируется схема, включающая транзистор T_2 с цепями ОС и «пустой» подсхемой на месте синте-

зируемой СКЦ. В диалоговой форме программы gMatch (см. рис. 2, б) указывается имя этой схемы и выбирается опция *Gain matching*. Ограничения на структуру выходной СКЦ следующие: число элементов $n = 3$; должны быть обеспечены подача питания через СКЦ на сток второго транзистора, а также развязка нагрузки усилителя по постоянному току.



а

При синтезе выходной СКЦ задавалось следующее требование к коэффициенту передачи в рабочем диапазоне частот: $-0,5 \text{ дБ} < G_T < 0 \text{ дБ}$. На рис. 4, а–в представлены три варианта схемы СКЦ, полученные с помощью программы gMatch и отвечающие всем поставленным условиям. Время синтеза цепей составило 20 с.

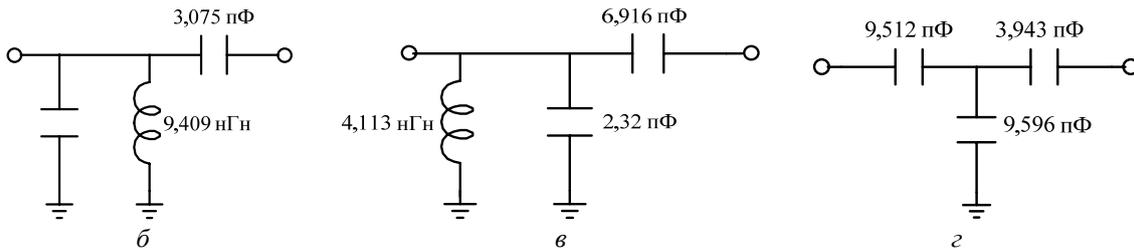


Рис. 4. Варианты выходной СКЦ, полученные с помощью программы gMatch

В качестве примера на рис. 4, з показана схема СКЦ, которая найдена программой gMatch в случае, когда не предъявлялись указанные выше требования к структуре цепи. Как видно, эта СКЦ не удовлетворяет условию подачи питания на транзистор. Таким образом, возможность задавать структурные ограничения на синтезируемые цепи действительно является важным преимуществом программы gMatch, позволяющим получать удобные на практике решения.

Окончательный выбор схемы СКЦ из полученного набора решений (см. рис. 4, а–в) выполняет пользователь, исходя из простоты реализации цепи в монолитном исполнении. В данном случае выбрана СКЦ на рис. 4, в в связи с тем, что в ней величина индуктивности минимальна. На рис. 5 показана частотная характеристика коэффициента передачи по мощности этой цепи. В рабочей полосе частот минимальный коэффициент передачи СКЦ (при импедансе генератора $Z_{\text{out}}^{(2)}$) равен $G_{T\text{min}} = 0,9132$ ($-0,394 \text{ дБ}$); неравномерность коэффициента передачи $\Delta G_T = 0,0324$ ($0,144 \text{ дБ}$); максимальный коэффициент отражения $|S|_{\text{max}} = 0,2946$. Таким образом, цепь обеспечивает необходимый уровень согласования на выходе усилителя.

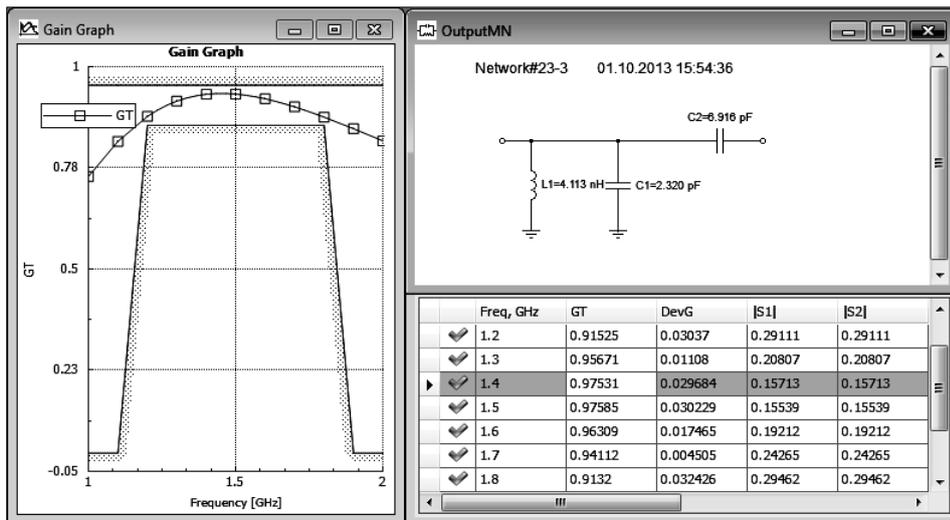


Рис. 5. Выходная СКЦ и частотная зависимость коэффициента передачи полученной схемы в программе gMatch

Последней синтезируется межкаскадная СКЦ, которая компенсирует спад с ростом частоты коэффициента усиления первого каскада и таким образом обеспечивает равномерную АЧХ всего усилителя. Предварительный расчет показал, что в диапазоне частот 1,2...1,8 ГГц коэффициент усиления транзистора T_1 с индуктивностью ОС L_{S1} и синтезированной входной СКЦ (см. рис. 4) уменьшается примерно на 4 дБ (с 14,33 до 10,21 дБ). Очевидно, межкаскадная СКЦ должна иметь

обратную частотную зависимость коэффициента передачи по мощности. С этой целью зададим следующие ограничения на коэффициент передачи G_T : $-4,1 \text{ дБ} < G_T < -3,9 \text{ дБ}$ на частоте 1,2 ГГц и $-0,2 < G_T < 0 \text{ дБ}$ на частоте 1,8 ГГц. Значения границ коэффициента передачи G_T^- и G_T^+ в промежуточных точках частотного диапазона с шагом 0,1 ГГц вычисляются программой автоматически на основе интерполяции. В качестве импеданса источника сигнала для межкаскадной СКЦ выступает выходной импеданс первого усилительного каскада $Z_{out}^{(1)}$, в качестве импеданса нагрузки – входной импеданс второго каскада $Z_{in}^{(2)}$ (рис. 2).

При синтезе использовались следующие требования к структуре цепи: число элементов $n = 5$; должна быть обеспечена подача напряжений смещения через СКЦ на сток первого транзистора и затвор второго транзистора, а также развязка каскадов усилителя по постоянному току.

В результате синтеза получено несколько вариантов СКЦ, но лишь один из них пригоден для использования. На рис. 6 показана схема и частотная характеристика коэффициента передачи по мощности выбранной СКЦ. Цепь удовлетворяет практически всем поставленным требованиям, за исключением небольшого подъема АЧХ в окрестности нижней граничной частоты. Время синтеза СКЦ составило 67 с.

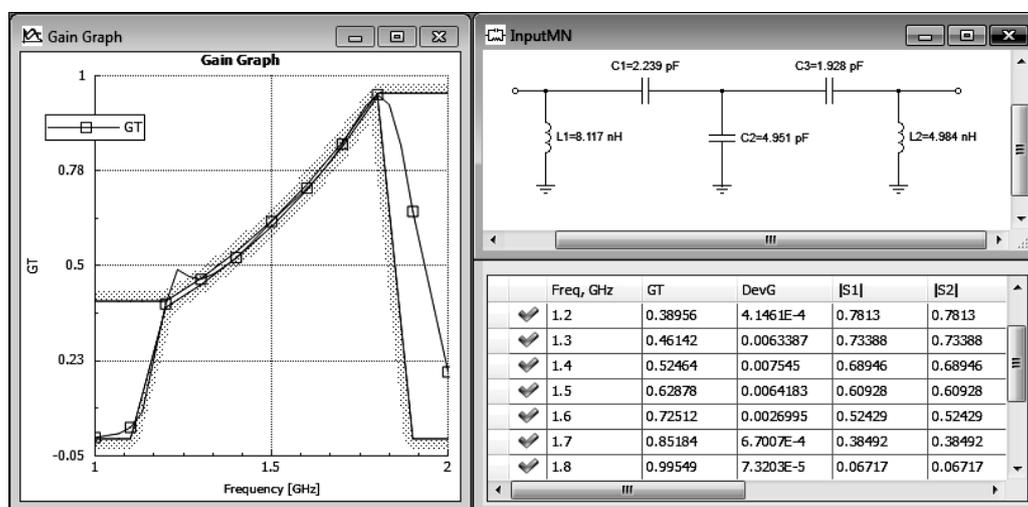


Рис. 6. Межкаскадная СКЦ и частотная зависимость коэффициента передачи полученной схемы в программе gMatch

Полученная в результате проектирования схема МШУ изображена на рис. 7.

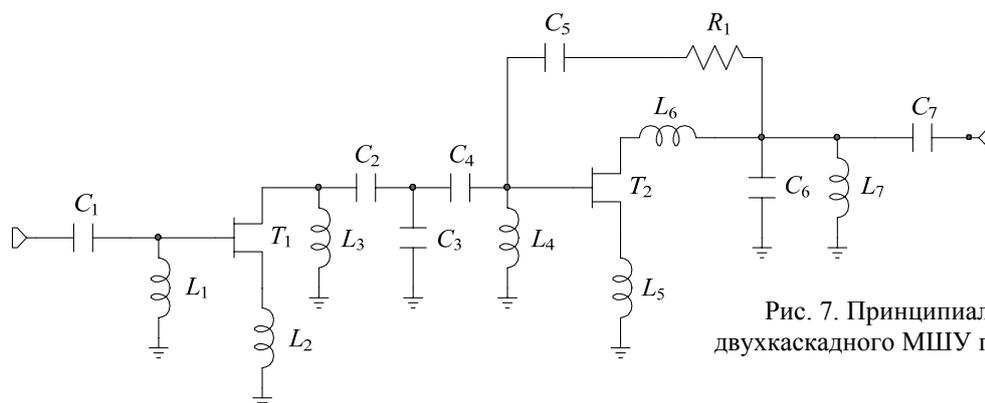


Рис. 7. Принципиальная схема двухкаскадного МШУ по СВЧ-сигналу

После этого была выполнена оптимизация величин элементов схемы МШУ на рис. 7 в САПР MWO и по ней с использованием библиотеки для 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии разработана топология кристалла МИС усилителя. На заключительной стадии в пакете MWO осуществлена финальная оптимизация топологии. Так как индуктивности L_1 и L_3 (см. рис. 7) имеют достаточно высокие значения (свыше 10 нГн), конструктивно их предполагается выполнить в виде внешних дискретных элементов (чипов), которые соединяются с МИС МШУ. Достоинством такого решения является большая добротность внешних индуктивностей по сравнению с монолитными, что приво-

дит к уменьшению коэффициента шума и увеличению коэффициента усиления усилителя. При моделировании МШУ индуктивности L_1 и L_3 описывались моделями из библиотеки дискретных элементов фирмы Murata.

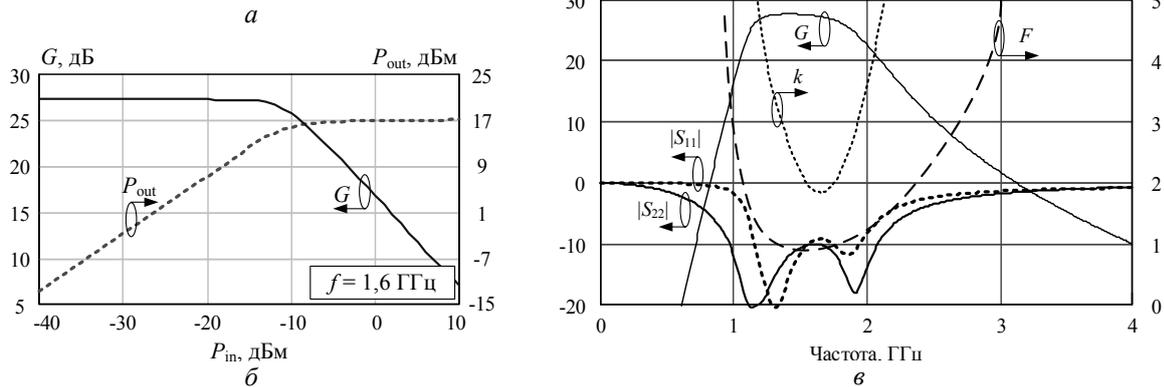
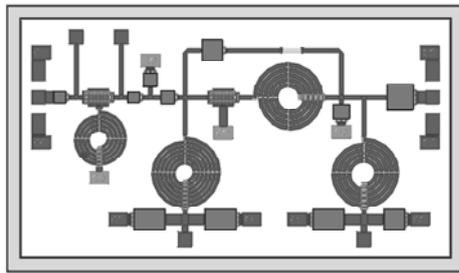


Рис. 8. Топология МИС МШУ (а) и результаты моделирования (б, в)

Таким образом, в соответствии с результатами моделирования разработанная МИС МШУ имеет следующие параметры: полоса рабочих частот 1,2–1,8 ГГц; коэффициент усиления $G = 27 \pm 0,5$ дБ; коэффициент шума $F \leq 1,3$ дБ; коэффициенты отражения по входу $|S_{11}| \leq -9,5$ дБ, по выходу $|S_{22}| \leq -10$ дБ; усилитель безусловно устойчив во всем частотном диапазоне ($k > 1$); выходная мощность при сжатии коэффициента усиления на 1 дБ $P_{out1dB} = +15$ дБм; напряжение питания 3 В; потребляемый ток 10 мА. После изготовления МИС МШУ будет проведено сравнение результатов моделирования с измерениями.

Заключение. Представлены результаты разработки МИС двухкаскадного МШУ диапазона частот 1,2–1,8 ГГц на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии. Усилитель удовлетворяет поставленному комплексу требований и предназначен для использования в приемниках ГНСС. Применение при проектировании МШУ программы автоматического синтеза СКЦ gMatch, интегрированной с САПР MWO, позволило значительно упростить и сократить срок разработки устройства.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.В37.21.0345, 14.132.21.1745), «Микроэлектроника» (14.740.11.1136, 14.В37.21.0462, 14.132.21.1598).

Литература

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / под ред. В.Н. Харисова, А.Ф. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
2. Бабак Л.И. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Ч. 1. Описание процедуры проектирования / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Доклады ТУСУР. – 2006. – № 6 (14). – С. 11–23.
3. Бабак Л.И. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Ч. 2. Программная реализация и примеры / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Доклады ТУСУР. – 2007. – № 1(15). – С. 10–19.
4. Самуилов А.А. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей для СВЧ МИС / А.А. Самуилов, Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман // Доклады ТУСУР. – 2012. – Т. 2 (26). – Ч. 2. – С. 127–137.
5. Бабак Л.И. Автоматизированный синтез согласующих цепей на основе генетического алгоритма / Л.И. Бабак, В.А. Вьюшков // Сб. докл. Междунар. научн.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: ТУСУР, 2005. – С. 102–105.

6. Бабак Л.И. Программа синтеза согласующих цепей на основе генетического алгоритма / Л.И. Бабак, В.А. Вьюшков // 16-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): матер. конф.: в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2006. – Т. 1. – С. 209–210.
7. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик / под ред. В.М. Курейчика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 – 320 с.
8. Дорофеев С.Ю. Организация универсальной программной системы для синтеза радиоэлектронных устройств на основе генетического алгоритма / С.Ю. Дорофеев, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУР. – 2007. – №2 (16) – С. 151–156.
9. Разработка интеллектуальной системы автоматизированного проектирования СВЧ-устройств INDESYS / Л.И. Бабак, С.Ю. Дорофеев, М.А. Песков, М.В. Черкашин, Ф.И. Шеерман, А.О. Абрамов, А.А. Самуилов // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 1. – С. 93–96.
10. Интеграция программы синтеза согласующих цепей в среду проектирования СВЧ устройств Microwave Office / Ф.И. Шеерман, А.С. Барышников, М.В. Нехорошев, В.А. Вьюшков, Л.И. Бабак // 16-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): матер. конф.: в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2006. – Т. 1. – С. 211–212.
11. Robertson I.D. RFIC and MMIC Design and Technology. – London: The Institution of Electrical Engineers, 2001. – 562 p.

Калентьев Алексей Анатольевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП),
мл. науч. сотрудник лаборатории интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) ТУСУРа
Тел.: 8-923-408-04-08
Эл. почта: alexey.kalentyev@gmail.com

Добуш Игорь Мирославович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ЛИКС
Тел.: 8(382-2) 41-47-17
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Бабак Леонид Иванович

Доктор техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии», проф. каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: 8-960-969-91-52
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Гарайс Дмитрий Викторович

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа, мл. науч. сотрудник ЛИКС
Тел.: 8-913-116-74-50
Эл. почта: dvgarays@gmail.com

Горяинов Александр Евгеньевич

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа, мл. науч. сотрудник ЛИКС
Тел.: 8-913-841-24-29
Эл. почта: goryainov.alex@gmail.com

Kalentyev A.A., Dobush I.M., Babak L.I., Garays D.V., Goryainov A.E.

Computer-aided design of MMIC low noise amplifier for GNSS receiver based on genetic algorithm

The design of 1.2-1.8 GHz 0.15 μm GaAs pHEMT MMIC low noise amplifier for GNSS receiver is presented. LNA is designed with using a software tool gMatch that provides the synthesis of matching and compensation networks (MCNs) based on genetic algorithm (GA). An approach to the structural and parametrical GA-based MCN synthesis is briefly described. The abilities of gMatch tool, amplifier design flow, and MMIC LNA performances are considered.

Keywords: GNSS receiver, low noise amplifier, pHEMT, matching and compensation networks, synthesis, genetic algorithm.