

12, декабрь 2015

УДК 621.396.62

Исследование и модернизация РЧ/ПЧ тракта транспондера Ku-диапазона спутника «Экспресс-АМ6»

Поймалин В.Э., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

*Научный руководитель: Ковалев В.Г., д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Технологии приборостроения»*

k_rl6@bmstu.ru

Введение

В настоящее время, для обеспечения мобильной связи, навигации, теле-, радио- и интернет- вещания создаются системы спутниковой связи, состоящие из земного и космического сегментов. Каждый спутник, входящий в состав космического сегмента системы, предназначен для приема, преобразования и передачи сигнала с наименьшими потерями преобразования. Выполнение этих функций напрямую зависят от блоков, составляющих полезную нагрузку спутника, представленную 4 видами транспондеров (преобразующих приемопередатчиков), транспондеры L-, C-, Ku- и Ka- диапазонов. Они обеспечивают работу спутника в выделенной полосе частот. На сегодняшний день в России производится оборудование только L-диапазона, транспондеры других диапазонов закупаются. Это приводит к ряду проблем при проектировании оборудования на иностранной элементной базе, основными из которых являются отсутствие адекватных данных по надежности, а также ограничение объема поставок. Для выполнения изделиями необходимых задач, обеспечения и повышения заданных показателей надежности и уменьшение зависимости от импортных поставщиков необходимо проводить импортозамещение элементной базы (т.е. рациональный выбор отечественных аналогов).

Спутник «Экспресс-АМ6»

Рассмотрим строение спутника на примере недавно выведенного на орбиту спутника «Экспресс-АМ6». «Экспресс-АМ6» — российский спутник тяжелого класса негерметичного исполнения с большим количеством транспондеров и развитой антенной

системой. На него установлены: 14 транспондеров С-диапазона. Стволы С-диапазона имеют полосу пропускания 40 МГц и расположены с шагом 50 МГц. Используется поляризационное уплотнение стволов с круговой поляризацией. 44 транспондера Ku-диапазона. 12 транспондеров Ka-диапазона. 2 транспондера L-диапазона. Спутник «Экспресс-АМб» сохраняет технологию прямой ретрансляции в сочетании с коммутацией сигналов между лучами с использованием трех шлюзов, связанных между собой по наземным линиям. Спутник рассчитан на полное покрытие территории России плюс частичное покрытие некоторых стран ближнего востока и Африки.

Транспондеры Ku и Ka диапазонов не являются разработками нашей промышленности и на данный момент времени закупаются в Канаде, в связи с чем и встал вопрос об импортозамещении этих блоков.

Рассмотрим строение транспондера Ku-диапазона. Он состоит из: блока малошумящего усилителя (МШУ), блока радиочастотного(РЧ)/промежуточночастотного (ПЧ) тракта, блока преобразователя постоянный ток (Direct Current (DC)) / постоянный ток (DC), блока гетеродина. Нас интересует РЧ/ПЧ тракт и входящий в него МШУ (рис.1).

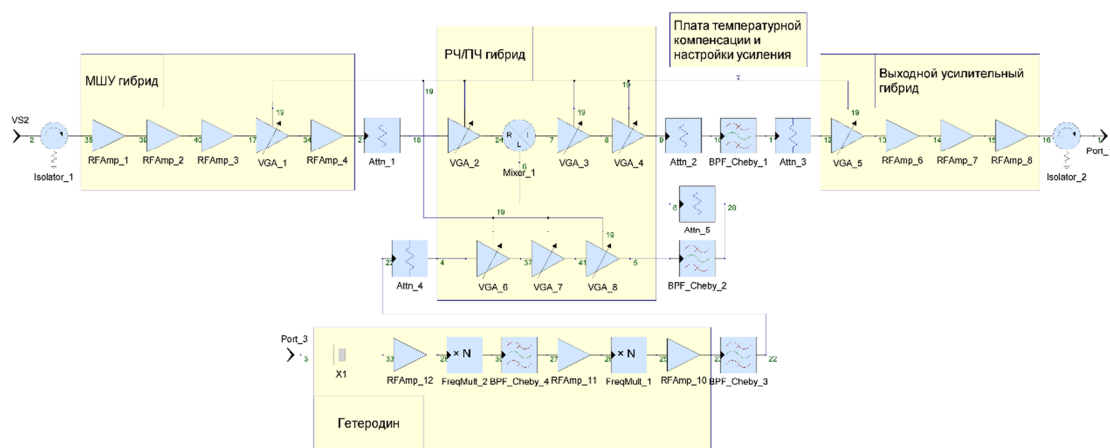


Рис. 1. Функциональная схема приемника

МШУ состоит из трех малошумящих каскадов на GaAs полевых транзисторах. Четвертый каскад, широкополосный на ММІС. Последний каскад основан на GaAs полевом транзисторе для поддержания высокой выходной интермодуляции МШУ. Цель усилителя, обеспечить низкое усиление шума на входе полосы пропускания с коэффициентом усиления, делающим смеситель и выходной каскад усилителя не чувствительными к шуму. Другая цель, отклонение полосы передачи, а также частотного диапазона изображения.

Ку-диапазонный РЧ/ПЧ гибрид спроектирован по технологии LTCC. Он состоит из одного РЧ ММІС усилителя, одного ММІС смесителя, двух ПЧ ММІС усилителей и трех НЧ ММІС усилителей. Ку-диапазонный РЧ/ПЧ гибрид, спроектирован для передачи полного усиления 20 дБ. Однако напряжения на выводы для всех ММІС усилителей, устанавливается в зависимости и от исходных, и от температурно-компенсированных значений напряжений. Вторая функция обеспечивается применением схемы температурной компенсации, которая использует терморезисторы и диоды для управления напряжением на затворе при изменении температуры для каждого усилителя. В РЧ сегменте используется монолитный двузатворный малошумящий усилитель с Автоматической Регулировкой Усиления (АРУ (AGC)) через контрольный затвор, который также используют для начальной установки и температурной компенсации, второй затвор открыт и не используется. Такой же тип ММІС также используют в ПЧ усилителях, контрольный затвор служит для установки начального значения напряжения и температурной компенсации.

Ку-диапазонный выходной ПЧ гибрид спроектирован по технологии LTCC. Гибрид состоит из одного ММІС усилителя, одного выходного усилителя и двух каскадов балансных усилителей. Выходной гибрид спроектирован для полного перекрытия ПЧ диапазона, т.е. от 10.70 до 12.75 ГГц, и имеет значение - 26.5 ± 2 дБ. Первый ММІС усилитель служит для установки значения усиления и температурной компенсации для всей РЧ/ПЧ цепи.

После построения функциональной схемы в среде Agilent Genesys надо провести анализ функциональных блоков на 4 интересующих нас параметра для создания аналога с импортозамещением. Анализ проводится на нахождение уровня (рис. 2): коэффициента усиления (КУ); коэффициента шума (КШ); точки 1 дБ компрессии (OP1dB); точки интермодуляции 3 порядка (IP3).

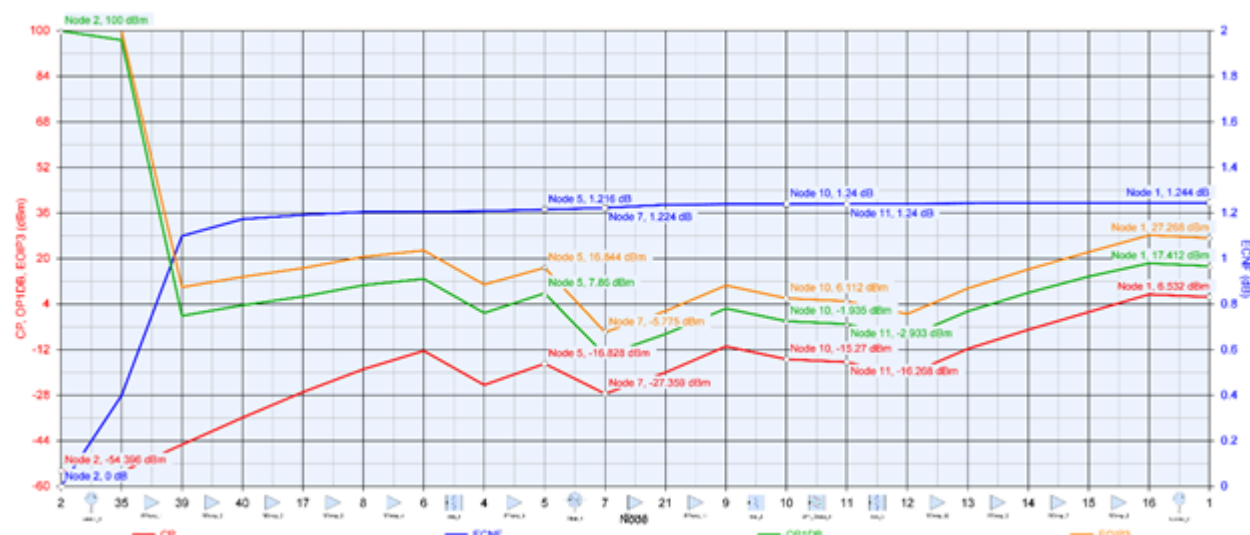


Рис. 2. Диаграммы уровней приемника Ку-диапазона

В описываемом приборе КУ равен 60 дБ. Основное усиление приходится на МШУ и выходной усилительный гибрид. Потеря усиления идет за счет аттеннуаторных элементов и фильтра. Более высокое усиление сложно получить в связи с ухудшением остальных параметров схемы при изменении элементной базы.

КШ в данной схеме составляет 1,244 дБ и основным его источником служат 3 первых элемента. Первый элемент, вентиль служит для согласования антенны и РЧ тракта по сопротивлению, из-за чего его нельзя убрать из схемы и приходится делать поправку на его шум. Поэтому для схемы выбираются МШУ с первичными каскадами усиления с наименьшим из возможных коэффициентом шума и соответственно малым коэффициентом усиления. Дальнейшие элементы не сильно влияют на шумовые характеристики схемы.

Так как точка 1 дБ компрессии не является единым числовым показателем всей цепи в целом, а может рассматриваться для каждого элемента в отдельности, то нас будет интересовать значение этой величины только на выходе нашей цепи. Значение на выходе равно 17,412 дБм. А, следовательно, и наши аналоги должны будут иметь схожие линейные характеристики системы.

Так же, как и точка 1 дБ компрессии точка интермодуляции 3 порядка не является единым числовым показателем всей цепи, поэтому мы будем рассматривать лишь значение этой величины на выходе нашей схемы, где оно равняется соответственно 27,266 дБм.

Разработка схем аналогов приемника

При разработке схемы аналога основными характеристиками для моделирования будут служить: КУ, КШ, OP1dB и IP3, но так как оборудование спутниковое и в связи с габаритами не может содержать в себе дополнительные схемы шумоподавления, то первоначальными параметрами отбора элементов будут служить полосы частот, на которых может работать элемент и коэффициент шума. А все остальные параметры должны находиться в пределах, установленных ТЗ которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Техническое задание

Рассматриваемые параметры	Исходные данные	Данные аналога
Усиление	60 дБ	±5 дБ
Коэффициент шума	1,3 дБ	±0.3 дБ
Входная частота	14 250 МГц	±250 МГц
Частота гетеродина	3300 МГц	±300 МГц
Выходная частота	10950 МГц	±250 МГц
Точка IP3	27 дБм	±9 дБм
Точка 1 дБ компрессии	17 дБм	±3 дБм
Габариты	160 ×112×54 мм	±10 %
Масса	0.75 кг	±10 %

Для всех аналогов используются вентили китайской фирмы «Kete», и фильтры, используемые предприятием ФГУП НИИР.

Аналог схемы на элементной базе фирмы Masom

На рис. 3 представлена функциональная схема аналога данной схемы.

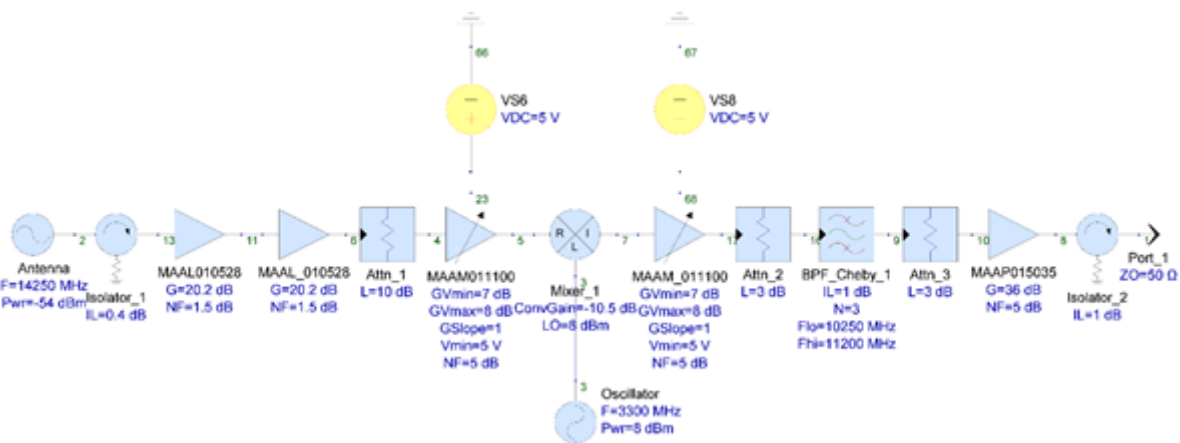


Рис. 3. Функциональная схема аналога приемника Ку-диапазона на элементной базе фирмы Masom

Самым маломощным элементом, представленным в справочнике является МААL-010528, с КШ равным 1,6 дБ и КУ равным 20,2 дБ. Так как КУ элемента столь высок, можно поставить всего 2 каскада усиления, в связи с чем, соответственно, уменьшатся полные габариты схемы, и при этом само усиление не сильно изменится по сравнению с оригинальной схемой. Для схемы требуются аттенюаторы с номиналами 10 дБ и 3 дБ, для снижения мощности при переходе между гибридными элементами. После понижения мощности, при переходе сигнала из МШУ в смеситель, ставится один регулируемый усилительный каскад, элемент МААМ-011100 перед, непосредственно, смесителем и один усилительный каскад, элемент МААМ-011100 после смесителя для увеличения мощности ПЧ. Выходной каскад усиления состоит всего из одного усилительного элемента. МААР-015035. После полного прохождения цепи РЧ/ПЧ тракта, входной сигнал с характеристиками: Мощность, минус 54 дБ; Частота. 14250 МГц. Приобрёл значения: Мощность. 7,792 дБ; Частота. 10250 МГц; Шум. 1,967 дБ; ОР1dB. 21,242 дБм; IP3. 28,852 дБм (рис. 4).

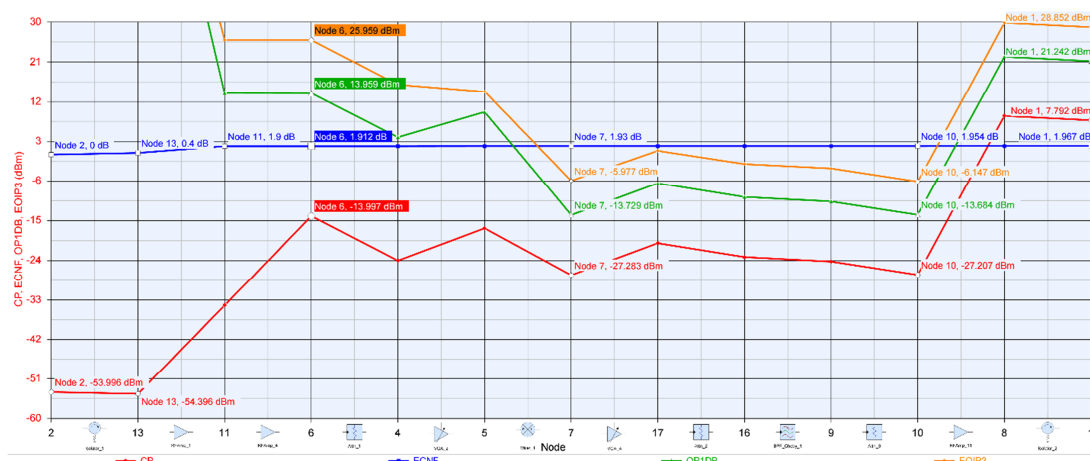


Рис. 4. Диаграммы уровней для схемы аналога приемника Ку-диапазона

Из чего можно сделать вывод, что общий КУ схемы равен. 62 дБ;
 КПД. 1,967 дБ (не входит в допуск ТЗ); ОР1дБ. 21,242 дБм (не входит в допуск ТЗ); IP3. 28,852 дБм. А исходя из принципов уменьшения количества элементов в схеме можно сделать вывод, что габариты и вес войдут в допуск ТЗ.

Аналог схемы на элементной базе фирмы Neditek

На рис. 5 представлена функциональная схема аналога на элементной базе фирмы Neditek.

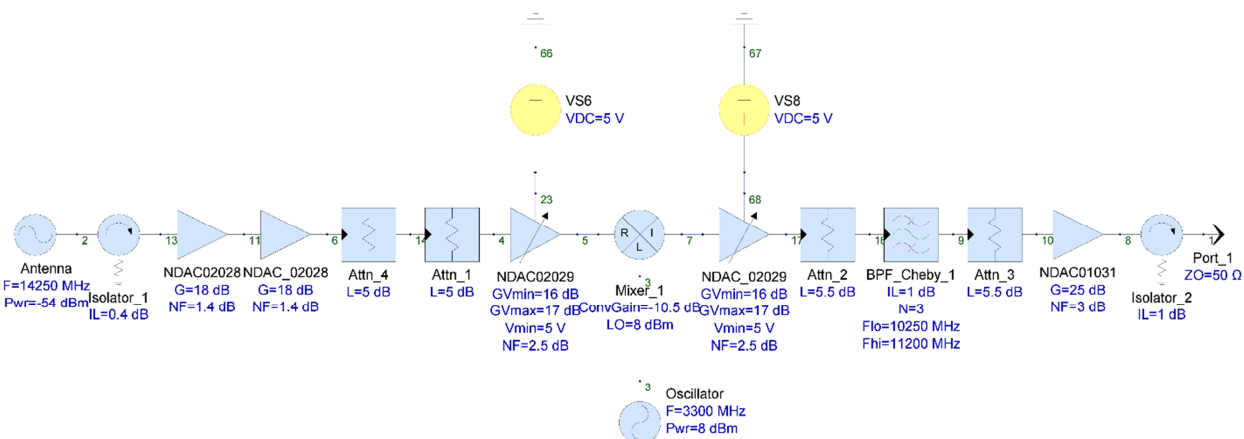


Рис. 5. Функциональная схема аналога приемника Ку-диапазона на элементной базе фирмы Neditek

Самым малолучающим элементом, представленным в справочнике является NDAC02028, с КПД равным 1,4 дБ и КУ равным 18 дБ. Так как КУ элемента столь высок, можно поставить всего 2 каскада усиления, в связи с чем, соответственно, уменьшатся полные габариты схемы. Для схемы требуются аттенюаторы с номиналами 5 дБ

(NDAC05014. 2 шт.) и 5.5 дБ (NDAM04012. 2 шт.), для снижения мощности при переходе между гибридными элементами. После понижения мощности, при переходе сигнала из МШУ в смеситель, ставится один регулируемый усилительный каскад, элемент NDAC02029 перед, непосредственно, смесителем и один усилительный регулируемый каскад, элемент NDAC02029 после смесителя для увеличения мощности ПЧ. Выходной каскад усиления состоит всего из одного усилительного элемента. NDAC01031 с КУ равным 25 дБ, OP1dB равной 41,3 дБм и IP3 равной 43 дБм. После полного прохождения цепи РЧ/ПЧ тракта, входной сигнал с характеристиками: Мощность, минус 54 дБ; Частота. 14250 МГц. Приобрёл значения: Мощность. 5,316 дБ; Частота. 10250 МГц; Шум. 1,843 дБ; OP1dB. 14,205 дБм; IP3. 22,365 дБм (рис. 6).

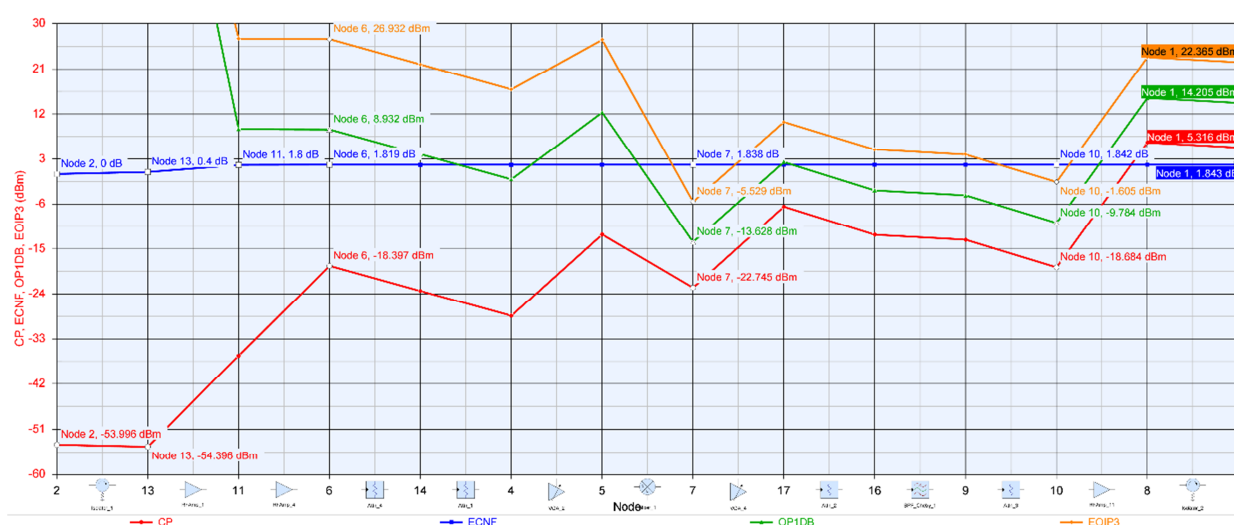


Рис. 6. Диаграммы уровней для схемы аналога приемника Ku-диапазона выполненного на элементах фирмы Neditek

Из чего можно сделать вывод, что общий КУ схемы равен. 59 дБ; КШ. 1,843 дБ (не входит в допуск ТЗ); OP1dB. 14,205 дБм; IP3. 22,365 дБм. А исходя из принципов уменьшения количества элементов в схеме, можно сделать вывод, что габариты и вес войдут в допуск ТЗ.

Аналог схемы на элементной базе фирм Neditek и Metda

Самым маломощным элементом, представленным в справочниках является NDAC02027, с КШ равным 1.4 дБ и КУ равным 23 дБ. Для схемы требуются аттенюаторы с номиналами 13 дБ (NC1338C-120A) и 3 дБ (NDAM04012. 2 шт.), ставятся один регулируемый усилительный каскад, элемент NDAC02029 перед, непосредственно,

смесителем и один усилительный регулируемый каскад, элемент NDAC02029 после смесителя (рис. 7).

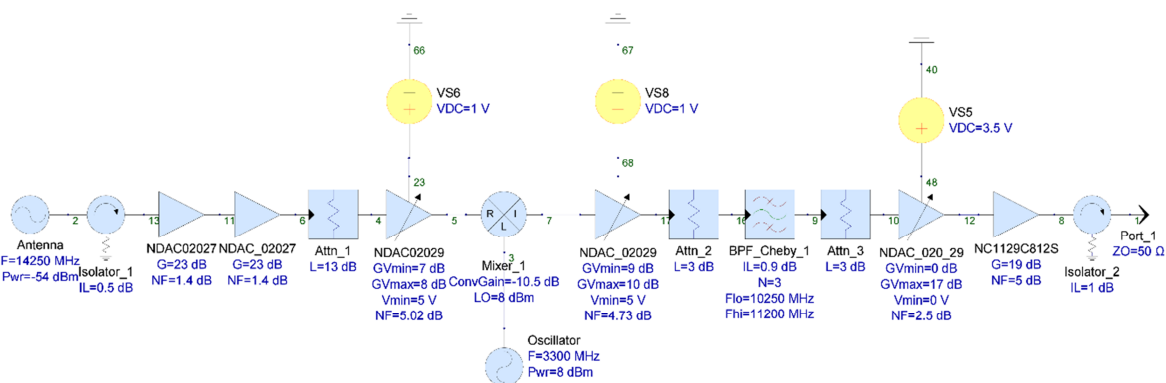


Рис. 7. Функциональная схема аналога приемника Ku-диапазона на элементной базе фирм Neditek и Metda

Выходной каскад усиления состоит из двух усилителей. Одного подстроечного элемента. NDAC02029 и одного усилителя на выходе, по которому и будут рассматриваться все выходные параметры. NC1129C812S с КУ равным 19 дБ, OP1dB равной 21 дБм и IP3 равной 36 дБм. После полного прохождения цепи РЧ/ПЧ тракта, входной сигнал с характеристиками: Мощность. минус 54 дБ; Частота. 14250 МГц. Приобрёл значения: Мощность. 7,722 дБ; Частота. 10250 МГц; Шум. 1,938 дБ; OP1dB. 16,447 дБм; IP3. 26,982 дБм (рис. 8).

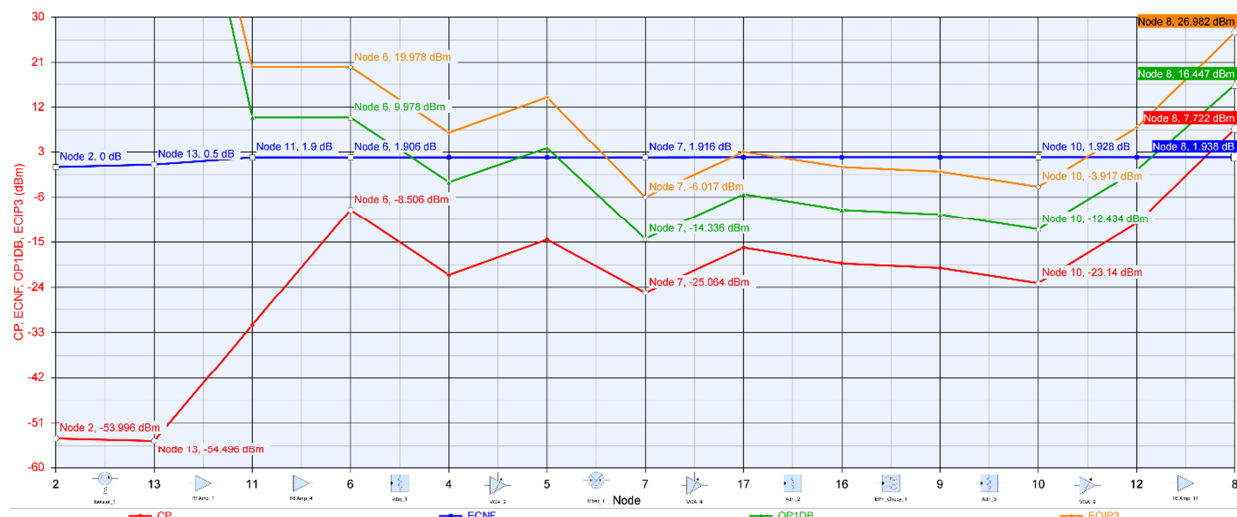


Рис. 8. Диаграммы уровней для схемы аналога приемника Ku-диапазона, выполненного на элементах фирм Neditek + Metda

Из чего можно сделать вывод, что общий КУ схемы равен. 62 дБ; КПД. 1,938 дБ (не входит в допуск ТЗ); OP1dB. 16.447 дБм; IP3. 26,982 дБм. А исходя из принципов

уменьшения количества элементов в схеме можно сделать вывод, что габариты и вес войдут в допуск ТЗ.

Аналог схемы на элементной базе фирм Neditek, Metda, NEC

На рис. 9 представлена схема аналога приемника Ку-диапазона на элементной базе фирм Neditek, Metda, NEC.

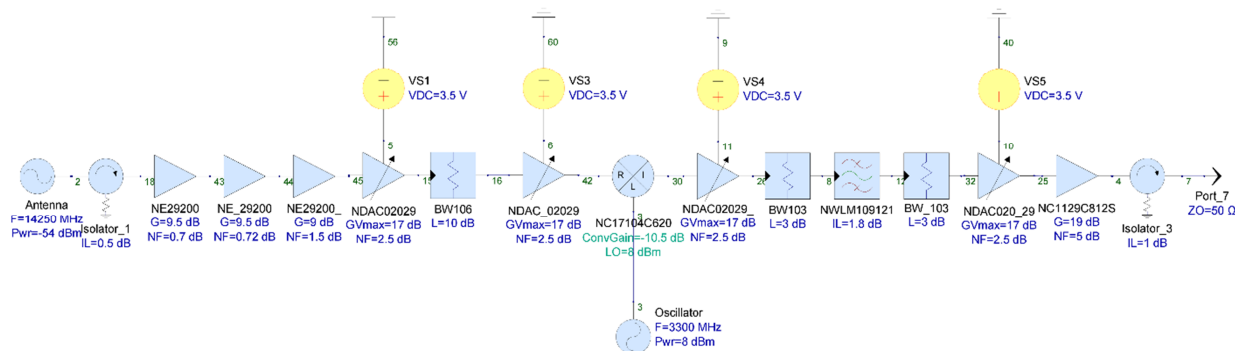


Рис. 9. Функциональная схема аналога приемника Ку-диапазона на элементной базе фирм Neditek, Metda, NEC

Первый каскад МШУ представлен усилителем NE29200 с КШ равным 0,7 дБ и КУ равным 9,5 дБ. Второй и третий каскады будут состоять из этих же усилителей для установки нужного уровня мощности сигнала. Четвертый каскад построен на подстраиваемом усилителе NDAC02029 с КУ равным 17 дБ. Для схемы требуются аттенюаторы с номиналами 10 дБ (NC1338C-120C) и 3 дБ (NDAM04012. 2 шт.). Один регулируемый усилительный каскад, элемент NDAC02029 перед, смесителем и один. элемент NDAC02029 после смесителя. Выходной каскад усиления состоит из двух усилителей. Одного подстроечного элемента. NDAC02029 и одного усилителя на выходе, по которому и будут рассматриваться все выходные параметры. NC1129C812S с КУ равным 19 дБ, OP1dB равной 21 дБм и IP3 равной 36 дБм. После полного прохождения цепи РЧ/ПЧ тракта, входной сигнал с характеристиками: Мощность, минус 54 дБ; Частота. 14250 МГц. Приобрёл значения: Мощность. 10,014 дБ; Частота. 10250 МГц; Шум. 1,362 дБ; OP1dB. 17,888 дБм; IP3. 34,45 дБм (рис. 10).

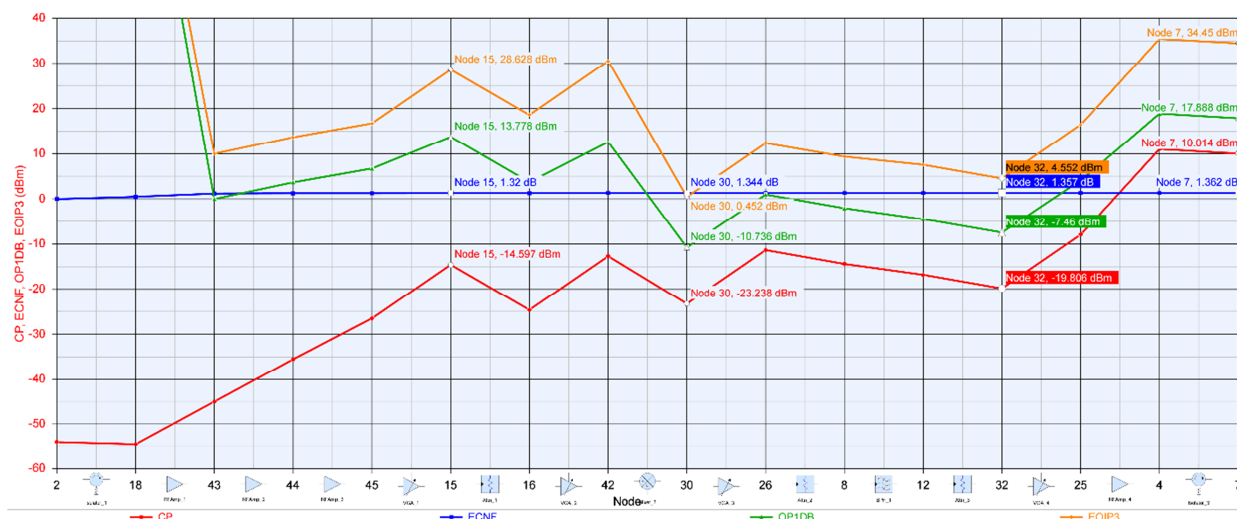


Рис. 10. Диаграммы уровней для схемы аналога приемника Ку-диапазона выполненного на элементах фирм Neditek, Metda, NEC

Из чего можно сделать вывод, что общий КУ схемы равен. 64 дБ; КШ. 1.326 дБ; OP1dB. 17,888 дБм; IP3. 34,45 дБм. Исходя из принципов уменьшения количества элементов в схеме можно сделать вывод, что габариты и вес войдут в допуск ТЗ.

Вывод

В связи с тем, часть схем не входят в допуск ТЗ по КШ, то конечной формой аналога является схема, собранная на элементах фирм Neditek, Metda, NEC. И наш конечный продукт схемотехнического решения будет представлен на рис. 11.

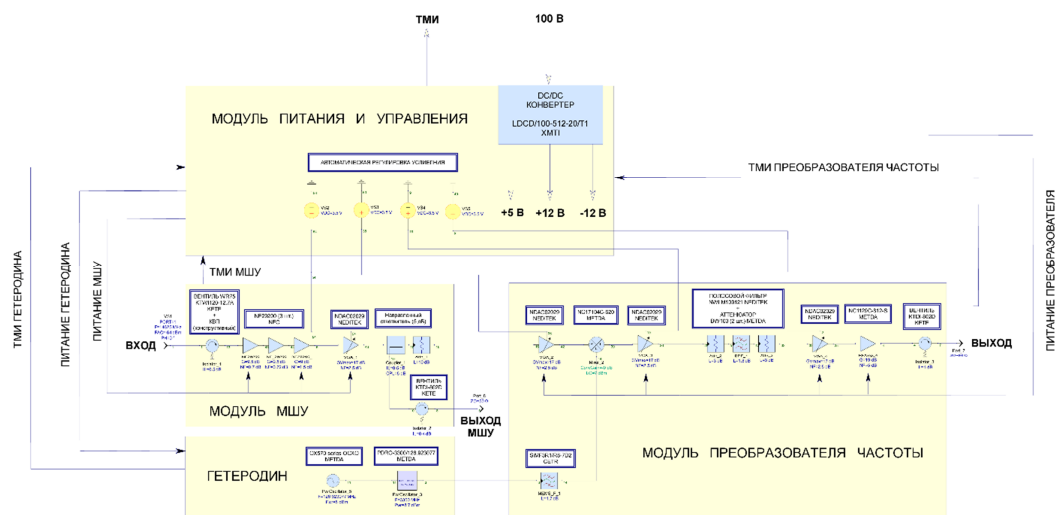


Рис. 11. Схема аналога приемника Ку-диапазона построенная на элементной базе фирм NEC, Neditek, Metda

Параметры схемы аналога будут следующими: КУ. 64 дБ; КШ. 1,326 дБ; OP1dB. 17.888 дБм; IP3. 34.45 дБм; параметры оригинальной схемы: КУ. 60 дБ; КШ. 1,3 дБ; OP1dB. 17 дБм; IP3. 27 дБм.

Следовательно, наш аналог по все параметрам, кроме коэффициента шума, лучше оригинальной схемы, представленной в этой работе.

Список литературы

1. Аболиц А.И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность. М.: ИТИС, 2004. 426 с.
2. Каганов В.И., Битюков В.К. Основы радиоэлектроники и связи: учебное пособие для вузов / под ред. В.И. Битюкова. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 542 с.
3. Титов А.А. Транзисторные усилители мощности МВ и ДМВ. М.: Солон, 2006. 325 с.