

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ АНТЕННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ИОНОЗОНДА

А. Д. Акчурин, Д. Ф. Хасанов, А. Л. Сапаев

Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18
E-mail: Adel.Akchurin@kpfu.ru

Аннотация. Выполнены полевые испытания компактных сверхширокополосных MMIC-усилителей и многоэлементных многокаскадных усилителей на дискретных транзисторах с ООС X-типа в качестве антенных усилителей короткоимпульсного ионозонда. Испытания в дневных условиях показали очевидное преимущество усилителей на дискретных транзисторах за счет имманентной способности усилителей с ООС X-типа отфильтровывать помехи с частотами выше 30 МГц за счёт использования многочисленных ферритовых трансформаторов между каскадами усилителя. Предложенный нами симметричный вариант усилителя с ООС X-типа сильнее ослабляет сильные помехи, чем классический несимметричный вариант такого усилителя.

Ключевые слова: короткоимпульсный ионозонд; широкополосный антенный усилитель; сверхширокополосный MMIC-усилитель; зондирование ионосферы

FIELD TESTS OF DIFFERENT ANTENNA AMPLIFIER CIRCUITS FOR SHORT PULSE IONOSONDE

А. Д. Akchurin, Д. Ф. Khasanov, А. Л. Sapaev

Abstract. Field tests of compact ultra-wideband MMIC-amplifiers and multielement multistage amplifiers on discrete transistors with X-type negative feedback as antenna amplifiers of a short-pulse ionosonde were performed. Tests in daytime conditions showed the obvious advantage of amplifiers on discrete transistors due to the intrinsic ability of amplifiers with X-type negative feedback to filter out interference with frequencies above 30 MHz due to the use of multiple ferrite transformers between amplifier stages. Our proposed symmetrical version of the X-type negative feedback amplifier attenuates strong interference more strongly than the classical asymmetrical version of such an amplifier.

Keywords: short-pulse ionosonde; broadband antenna amplifier; ultra-wideband MMIC amplifier; ionospheric sounding

Введение

Антенные усилители являются важнейшими узлами любого радиоприёмного устройства. Выбор правильной схемы усилителя определяет успешность выделения требуемого сигнала, особенно если это радарное широкополосное устройство в КВ диапазоне, типа ионозонда, использующего короткие радиоимпульсы ~50 мкс. КВ диапазон не просто является одним из самых зашумлённых, но и диапазоном, где очень сильные сигналы близлежащих передатчиков соседствуют с малыми сигналами либо от очень удалённых передатчиков, либо сильно ослабленных в дневное время от недалеко расположенных передатчиков [1, 2]. Всё это приводит к тому, что на ~20 метровой КВ антенне при простой 1 мс фурье-обработке 16 МГц полосы можно видеть сосредоточенные КВ-сигналы с амплитудами ~20 мкВ – 1 мВ и постоянный шумовой фон от индустриальных и атмосферных помех ниже 20 мкВ. И как с сожалением отмечалось в [1], городской радиоэфир ныне всё сильнее заполняется плохо контролируемыми широкополосными помехами, превышающими фон, от высокоскоростных коммутирующих ключей в бытовом и промышленном оборудовании для преобразования энергии, которые могут ещё дополниться от преобразователей в ветровых электростанциях.

Временную эволюцию такой картины смеси сосредоточенных сигналов и шума на выходе приемника с программной обработкой (SDR software-defined radio) сейчас повсеместно принято представлять в виде спектрограммы, именуемой в радиолюбительских кругах водопадом, и которую свободно можно наблюдать, подключившись к онлайн трансляции любого сетевого SDR приёмника (например, из сети KiwiSDR, WebSDR и др.). Особенности сигналов в КВ диапазоне можно подытожить так: большой разброс (~60 дБ) сосредоточенных сигналов, превышающих фоновый шум, и предположительно такой же диапазон (по крайней мере ~40

дБ) для сосредоточенных сигналов ниже фонового шума, требующих для своего обнаружения накопления и специальной спектральной обработки. Так в радиоастрономических исследованиях может достигаться чувствительность более чем на 50 дБ ниже фонового шума [1]. Короткие импульсы (~ 50 мкс) классического ионозонда ограничивают его возможности по обнаружению отраженного сигнала как при попадании рабочей частоты на сильную сосредоточенную помеху, так и в случае слабых отраженных сигналов, величина которых сравнима и меньше фонового шума, в первую очередь, из-за ограничений в применении накопления, определяемых изменчивостью ионосферы и высотным разрешением.

Часть этой работы по обнаружению отраженного сигнала в таких сложных условиях падает на антенный усилитель, точнее на правильный выбор схемы усилителя. Поскольку эта тема довольно древняя, то, казалось бы, должны были существовать типовые решения относительно антенных усилителей. Однако это не совсем так. Литература до 80-х годов была полна узкополосных антенных усилителей, связанных с тогда популярными узкополосными радиоприемниками. С появлением широкополосных (по меркам 90-х годов) пятиоктавных 1-32 МГц приемников схемотехника антенных усилителей сместились в сторону транзисторных усилителей с так называемыми трансформаторами на длинных линиях и/или транзисторных усилителей по схеме с общей базой с глубокой отрицательной обратной связью (ООС). В русскоязычной переводной литературе эта тематика наиболее полно представлена в книгах Реда (1989 и 1990 гг.) [2, 3]. Так схема широкополосного усилителя под названием усилителя с ООС X-типа представлена на рис. 3.6 в [2] и более детализировано на рис. 1.73 в [3]. При самой широкополосной реализации с глубокой ООС этого однокаскадного усилителя его усиление равно 2. На пороге 2000-х эта схемотехника как бы замерла в развитии и потихоньку стала выходить из употребления под натиском компактных, надёжных так называемых монолитных интегральных устройств (Monolithic Microwave Integrated Circuit или MMIC) на основе полупроводников из GaAs (арсенид галлия), GaN (нитрид галлия), InP (фосфид индия). И хотя основное направление таких полупроводников – СВЧ электронника до частот ~ несколько ГГц и выше, у многих усилителей нижняя граница может находиться ниже 1 МГц, что задаёт новый неимоверно широкий стандарт широкополосности (не менее 11 октав). Популярность MMIC-усилителей, обеспеченная массовостью приёмников ГНСС сигналов и сотовой связи, постепенно привела к тому, что MMIC-усилители постепенно вытеснили усилители на дискретных транзисторах из антенных усилителей (и предусилителей) изо всех современных радиоприемников и трансиверов любительской радиосвязи. Это позволило уменьшить число элементов на печатной плате (особенно катушек с ферритовыми сердечниками), а также удалить совсем усилитель КВ диапазона в сверхширокополосном радиоприемнике, оставив один общий на весь 11 октавный диапазон.

В ионозонде Циклон, запущенного в одноминутной скорости съёма ионограмм в 2010 году, использовался двухкаскадный усилитель с ООС (X-типа) с коэффициентом усиления 10 с немного зауженной полосой пропускания (~ 15 МГц) за счёт снижения глубины ООС. Часто в дневное время усиления такого двухкаскадного усилителя было недостаточно, что приводило к сложностям выделения отраженного сигнала на фоне индустриальных помех и помех от близкорасположенного метеорного радара. Для возможно большей адаптации к таким условиям эксплуатации было решено выполнить две задачи. Первая задача опробовать в полевых условиях рядом с передающей антенной бюджетные и компактные усилители на основе MMIC-сборок INA-02184 и SBB5089 в качестве антенного усилителя, легко доступные в настоящее время под торговыми названиями W-LNA-** и LNA-V1.0, соответственно (их внешний вид показан на рис. 1). По результатам такого тестирования необходимо решить, могут ли такие компактные усилители достойно заменить ныне использующийся несимметричный двухкаскадный усилитель с ООС X-типа. Вторая задача – попытаться ослабить сильные помехи (по отношению несимметричному усилителю с ООС X-типа), применив схему нашего модернизированного симметричного двухтактного усилителя с ООС X-типа, работающего на общую суммирующую катушку (рис. 2), подавляющей чётные гармоники, появляющиеся в случае сильной помехи. При этом было необходимо экспериментально определить минимальное число симметричных каскадов для выделения отраженных сигналов, когда каждый каскад был максимально широкополосным (~ 25 МГц) (т.е. выполнен с глубокой ООС и коэффициентом усиления 2). Кроме этого, нужно было

оценить степень ослабления сильных помех, создаваемых в приемной антенне, в том числе соседним радаром.

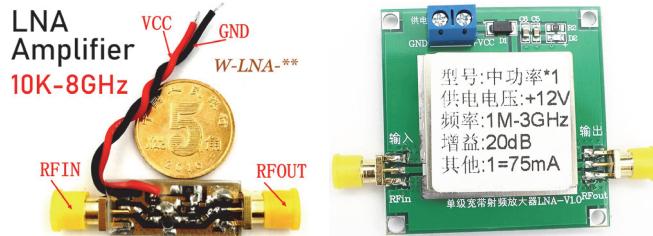


Рис. 1. Внешний вид плат усилителей с MMIC-сборками под торговыми названиями W-LNA-** (слева) и LNA-V1.0 (справа).

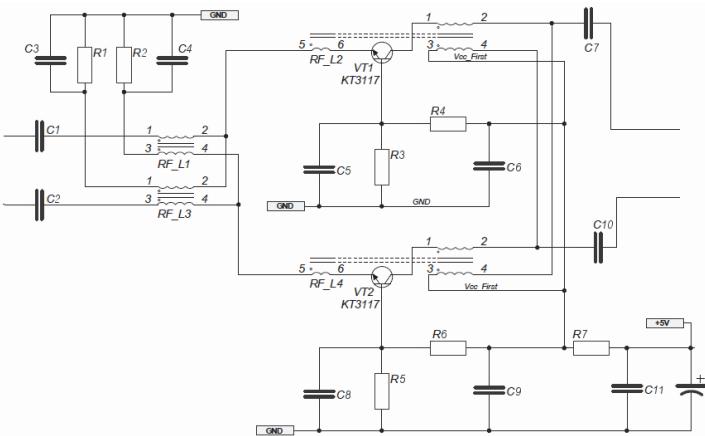


Рис. 2. Схема одного каскада симметричного двухтактного усилителя с ООС X-типа

Использование MMIC-сборок в качестве антенного усилителя

Все использованные усилители, собранные на транзисторных MMIC-сборках, оказались малопригодными для выделения коротких радиоимпульсов КВ диапазона в условиях его современной сильной зашумленности. Для иллюстрации приводим «сырую» ионограмму без её программной очистки, чтобы было легко сравнить амплитуды сильных помех и отраженного в дневное время 33 мкс радиоимпульса ионозонда Циклон при использовании LNA-V1.0 (рис. 3, слева). В качестве приёмной антенны использовалась классическая для первых ионосферных станций АИС дельта-антенна [4]. Цветовая кодировка представлена амплитудами от 14 разрядного АЦП дана в логарифмическом масштабе. Характерными чертами работы этого усилителя являются сильная перегрузка в низкочастотной части ионограммы (там амплитуды достигают $\sim 10^4$) и слабые (сравнимые с шумами) величины отраженных сигналов ($\sim 10^{2.5}$). Ионограммы при использовании другого усилителя W-LNA-** были ещё хуже (здесь не приводятся): отраженные сигналы ещё меньше, а ионограмма наполняется дополнительными импульсными вспышками, возбуждаемыми крутыми фронтами импульсных помех. Все перечисленные недостатки, очевидно, являются следствием высокой широкополосности MMIC-усилителей, которые можно ослабить, либо работая с длинными импульсами (> 700 мкс), либо устанавливая полосовые фильтры.

Использование симметричного двухтактного усилителя с ООС X-типа в качестве антенного усилителя

Сырые ионограммы для двух разновидностей усилителя с ООС X-типа, несимметричной и симметричной, показаны на рис. 3 в центре и справа, соответственно. Из полученных ионограмм очевидно, оба усилителя с ООС X-типа с коэффициентом усиления по напряжению ~ 10 дают примерно равную амплитуду отраженного сигнала, порядка $10^{2.5}-10^3$, что немного

больше, чем амплитуды у MMIC-усилителей. Зато усилители с ООС X-типа значительно снижают хаотический шум, причём симметричный усилитель делает это более эффективно. Удивительным оказалось, что симметричность усилителя не дала ему преимуществ в росте амплитуды отражённого сигнала по отношению несимметричному. Что привело к тому, что симметричному усилителю с глубокой ООС и наибольшей широкополосностью, имеющему усиление в 2 раза, необходимо иметь 3 каскада, чтобы получить усиление как у двухкаскадного несимметричного. К преимуществам 3-х каскадного симметричного усилителя можно отнести расширение полосы пропускания на 5 МГц (до ~20 МГц) и более эффективное ослабление сильных помех в низкочастотной части ионограммы.

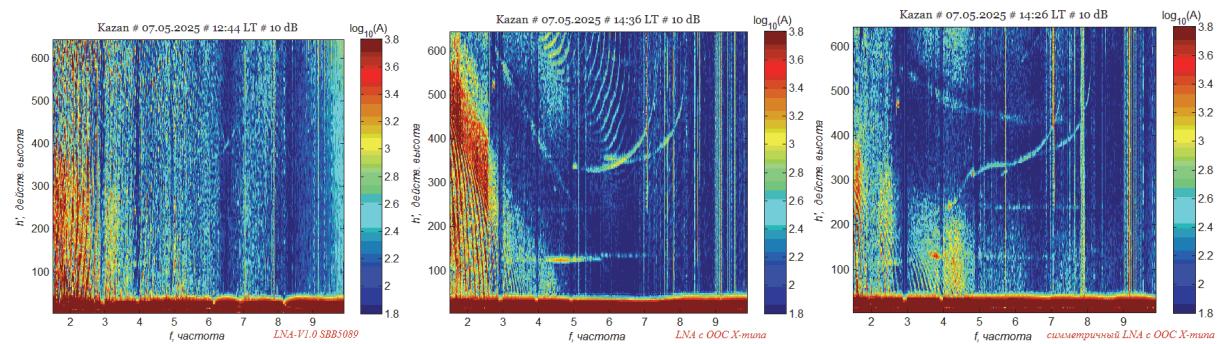


Рис. 3. Сырые ионограммы для MMIC усилителя LNA-V1.0 (справа) и для двух разновидностей усилителя с ООС X-типа, несимметричной (в центре) и симметричной (слева)

Заключение

Испытание в полевых условиях компактных сверхширокополосных MMIC-усилителей и многоэлементных многокаскадных усилителей на дискретных транзисторах с ООС X-типа в качестве антенных усилителей в дневных условиях повышенного ослабления коротких радиоимпульсов КВ-диапазона показало явное преимущество усилителей на дискретных транзисторах. Очевидно, это связано с сверхширокополосностью MMIC-усилителей, провоцирующей импульсные всплески, с одной стороны, и имманентной способностью усилителей с ООС X-типа отфильтровывать помехи, с частотами выше 30 МГц, за счёт использования многочисленных ферритовых трансформаторов между каскадами усилителя и кремниевых транзисторов с граничной частотой 200 МГц (как, например, у недорого транзистора КТ3117 и ему подобных импортных аналогов). Использование большего числа транзисторов в разработанном нами симметричном варианте усилителя с ООС X-типа, по отношению к схеме несимметричного усилителя, приведённой в книгах Реда, не дало преимуществ в амплитуде отраженного сигнала (при равных значениях усиления), зато заметно снизило уровень сильных помех.

Благодарности

Приятным долгом авторы считают возможность выразить свою признательность Зыкову Р.Н. за помощь в проведении полевых измерений и Папановой Н.А. за сборку и начальную настройку усилителей на печатной плате.

Список литературы

1. Jessner A. Industrial interference and radio astronomy // J. Adv. Radio Sci. – 2013. – Vol. 11. – P. 251–258. <https://doi.org/10.5194/ars-11-251-2013>
2. Ред Э.Т. Схемотехника радиоприемников: практическое пособие / пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 152 с.
3. Ред. Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: Схемы, блоки, 50-омная техника / пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 256 с.
4. Cones H.N., Cotton H.V., Watts J. M. A 600-ohm multiple wire delta antenna for ionospheric measurements // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1950. – Vol. 44. – P. 475–488.