

В.А. Солнцев, А.И. Шульга

ФГБОУ ВПО Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)

Исследование подавления нелинейных искажений сигнала в ЛБВ с помощью премодуляции тока электронного пучка

Работа направлена на линейризацию передаточных характеристик СВЧ-усилителей мощности, компенсацию ИМИ, что позволяет существенно повысить верность передачи информации, улучшить энергетические показатели, сузить рабочие полосы и увеличить надежность систем связи различного назначения.

Ключевые слова: СВЧ усилитель, амплитудная характеристика, интермодуляционные искажения, премодуляция тока электронного пучка.

В настоящее время в различных областях человеческой деятельности все большую роль играют различные системы связи. Во многих действующих системах связи, включая спутниковые системы связи России, в ретрансляторах используется многостанционный доступ с частотным разделением каналов. Поскольку при этом применяют большое число разночастотных (часто, многочастотных, групповых) сигналов, рабочие полосы ретрансляторов должны быть достаточно широки. Рост скоростей и объемов потоков информации требует повышенной пропускной способности каналов связи, что может быть достигнуто увеличением динамического диапазона и расширением рабочей полосы пропускания усилительных трактов.

Одним из самых распространенных широкополосных сверхвысокочастотных усилителей, имеющих высокую выходную мощность, является усилитель на спиральной лампе с бегущей волной (ЛБВ). Спиральные ЛБВ с высокими значениями коэффициента полезного действия, полосы пропускания, надежности и срока службы являются идеальными бортовыми усилителями мощности СВЧ всех типов спутников. Со времени изобретения Компфнером принципа действия ЛБВ эффективность преобразования энергии постоянного тока в высокочастотную энергию в спиральных ЛБВ возросла с 1% до 75% с перспективой дальнейшего увеличения до 80-85% в коммерческих спутниковых системах связи [1].

Важным стимулом к повышению КПД и уменьшению массы ЛБВ остаются экономические требования спутниковых систем. По современным оценкам снижение мощности источника питания на 1 Вт даст экономию в 7-9 тыс. евро, а уменьшение массы на 1 кг. – в 75 тыс. евро. Таким образом, если на борту спутника находится 40 ЛБВ с выходной мощностью 100 Вт каждая, то улучшение КПД на 1 процент и снижение массы ЛБВ на 100 г. дадут экономию примерно 750 тыс. евро. В процессе развития космических ЛБВ их удельная масса существенно уменьшилась с 40 г/Вт для первой ЛБВ С-диапазона (3,7-4,2 ГГц) до 6 г/Вт для современной ЛБВ того же С-диапазона [1].

Важной интегральной характеристикой трактов усиления, от которой зависит как КПД, так и масса прибора, и обработки сигналов является динамический диапазон, который связан, с одной стороны, с чувствительностью, а с другой стороны, с проявлением их

нелинейных свойств. Решение задачи расширения динамического диапазона систем связи и повышения качества их функционирования связано с обеспечением линейности усилительных трактов прохождения разночастотного сигнала. Большое влияние на качество каналов передачи информации оказывает нелинейность передаточных амплитудных характеристик (АХ) и фазоамплитудных характеристик (ФАХ) СВЧ-усилителей мощности (СВЧ-УМ).

Нелинейность АХ СВЧ-УМ проявляется в нелинейном АМ/АМ-преобразовании разночастотного сигнала, а неравномерность ФАХ — в паразитном преобразовании амплитудной модуляции в фазовую, т. е. в возникновении амплитудно-фазовой конверсии (АФК). Все это приводит к возникновению интермодуляционных искажений (ИМИ). Проблема создания широкополосных СВЧ усилителей с расширенным динамическим диапазоном традиционно является одной из основных задач радиотехники. Основной причиной, препятствующей расширению полосы принимаемых частот, являются паразитные каналы приема, образующиеся, в частности, за счет ИМИ СВЧ усилителя. Они ограничивают реальный динамический диапазон усилительных трактов. На современном этапе развития техники передачи, приема и обработки информации требования к динамическому диапазону возрастают с каждым годом. Это объясняется, во-первых, улучшением качественных показателей устройств, а во-вторых, существенным усложнением электромагнитной обстановки. Для многих радиосредств характерна устойчивая тенденция к усложнению приемопередающей аппаратуры, размещение ее на небольших площадях (на судах, самолетах, ретрансляторах и т. д.) или работающей от общих антенных устройств.

Нижняя граница динамического диапазона определяется шумами трактов, а верхняя — уровнем нелинейных искажений, т.е. фактически уровнями возникающих в СВЧ усилителе ИМИ. Нелинейные свойства тракта можно оценить с помощью допустимого коэффициента гармоник огибающей группового сигнала, относительного уровня комбинационных составляющих, коэффициента сжатия амплитуды радиосигнала и т. д.

Динамический диапазон и линейность передаточных характеристик приемопередающих трактов систем связи тесно связаны с друг другом и оказывают главное влияние на параметры и характеристики системы связи, такие как КПД и масса усилительного тракта.

В работе [2] описан новый метод подавления нелинейных искажений, основанный на премодуляции тока электронного пучка лампы с бегущей волной. В настоящей работе исследуется СВЧ усилитель на лампе с бегущей волной, АХ и ФАХ которой, как функции двух переменных – величины входного сигнала и тока электронного пучка, показаны на рис.1.

На рис. 2 представлена блок-схема экспериментальной установки, которая позволяет исследовать прохождение двухчастотного сигнала через усиливающую лампу с бегущей волной. По сравнению с типовой установкой в ней модернизирована цепь питания ЛБВ, в которую введен усилитель огибающей входного двухчастотного сигнала для эффективной премодуляции тока электронного пучка.

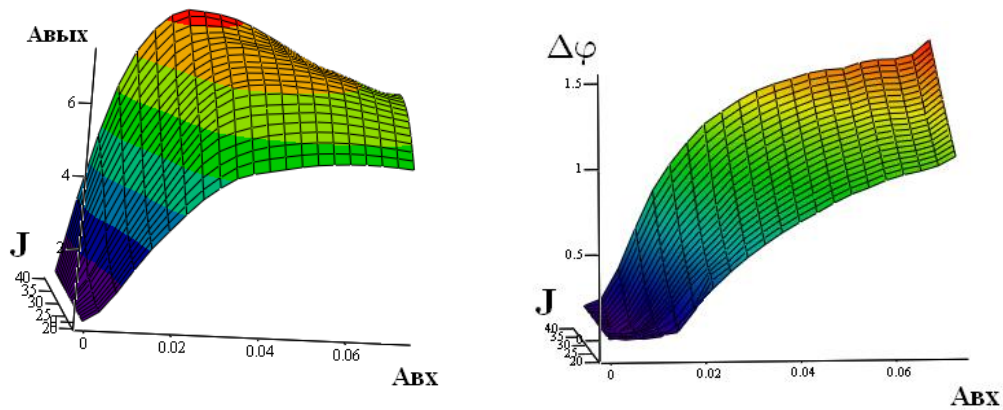


Рис.1. АХ и ФАХ исследуемой лампы.

Введение универсальных характеристик, которое базируется на квазистационарном методе анализа нелинейных искажений [3,4], позволяет оценить относительный уровень нелинейных искажений на выходе усилителя. Так, вблизи точки насыщения относительный уровень комбинационных составляющих третьего порядка равен -12дБ. Для выбранной лампы относительный уровень комбинационных составляющих третьего порядка вблизи точки насыщения сопоставим с теоретическими расчетами и составляет $-(-12,04)$ дБ.

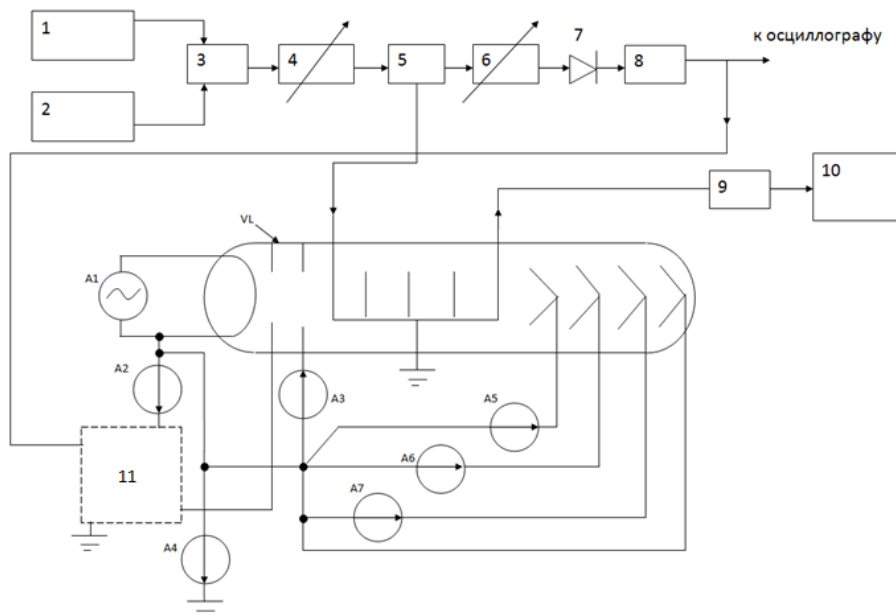


Рис.2. 1, 2 – генераторы сигналов высокочастотные Agilent N5183A; 3 – направленный ответвитель; 4 – поляризационный аттенюатор; 5 – направленный ответвитель; 6 – фазовращатель; 7 – детекторная головка; 8 – усилитель; 9 – выходной СВЧ-тракт; 10 – анализатор спектра Agilent E4447A; 11 – развязывающее устройство, А1 – источник питания подогревателя; А2 – источник питания управляющего электрода; А3 – источник питания анода; А4 – источник питания замедляющей системы; А5 – источник питания первого коллектора; А6 – источник питания второго коллектора; А7 – источник питания третьего коллектора; VL – испытуемая ЛБВ.

Спектр выходного сигнала, полученный с помощью спектр-анализатора Agilent E4447A, представлен на рис.3. В качестве источников сверхвысокочастотного сигнала использовались генераторы Agilent N5183A.

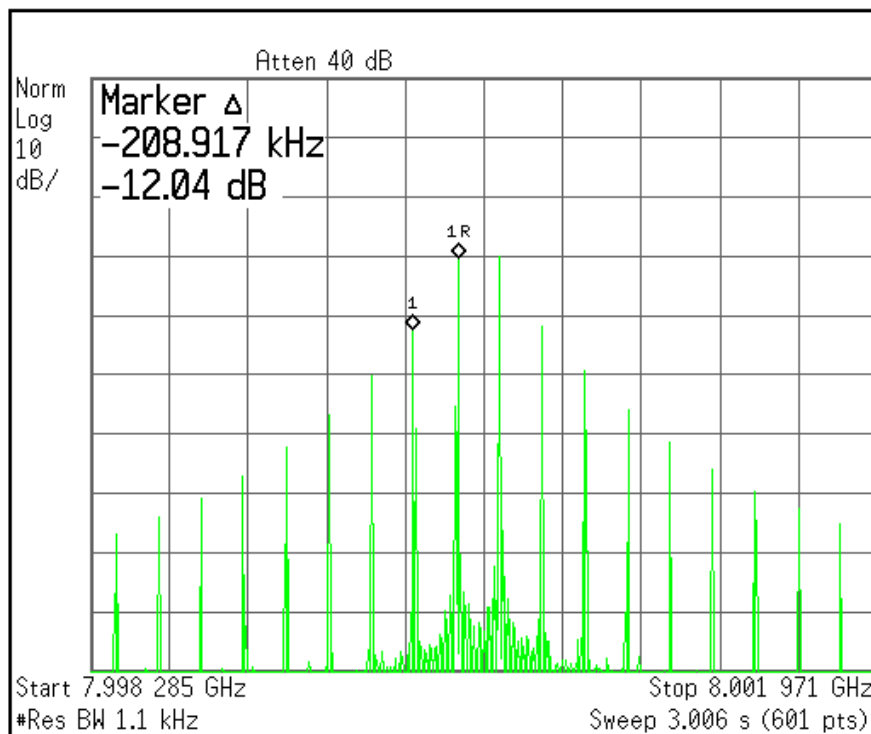


Рис.3. Спектр выходного сигнала при двухчастотном режиме работы ЛБВ

Для осуществления преамбуляции тока электронного пучка была усовершенствована цепь питания лампы с бегущей волной, основными элементами которой являются: направленный ответвитель (5 рис.2), фазовращатель (6 рис. 2), детекторная головка (7 рис.2), усилитель огибающей СВЧ сигнала (8 рис.2) и развязывающее устройство (11 рис.2). Учитывая особенности применения был спроектирован и изготовлен усилитель огибающей СВЧ сигнала, принципиальная схема которого приведена на рис.4.

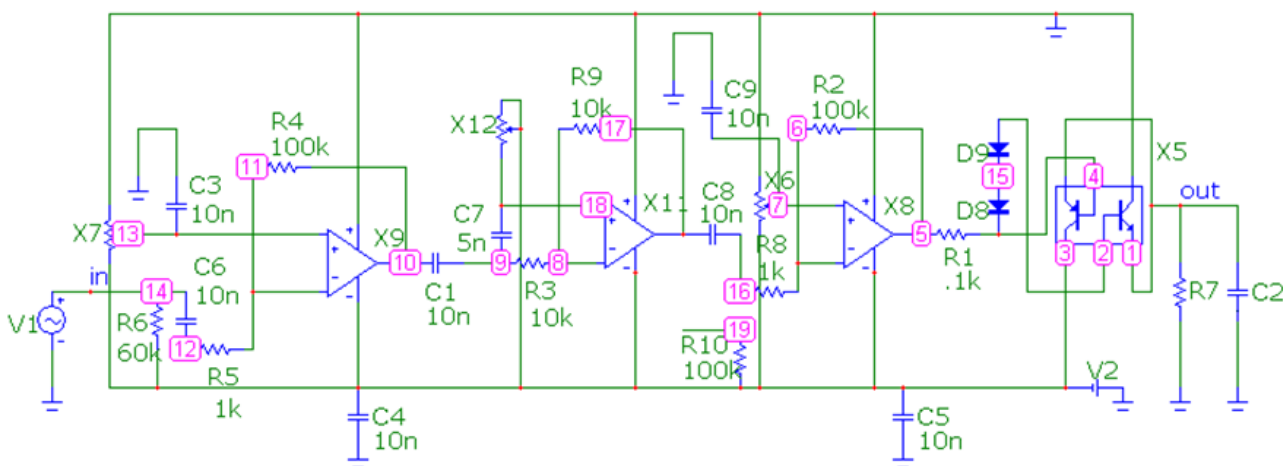


Рис. 4. Схема усилителя огибающей входного сигнала.

Основными требованиями к данному усилителю являются: отсутствие паразитных колебаний, которые могут возникнуть в результате самовозбуждения; требования по коэффициенту усиления; возможность плавной регулировки (механической или электронной) коэффициента усиления тракта обработки огибающей. Регулировка позволяет оптимизировать работу цепи питания и повысить эффективность подавления при усилении сложных многочастотных сигналов. Предложенная схема реализации усилителя огибающей СВЧ сигнала позволяет варьировать коэффициент усиления последнего от сотых долей децибела до 25дБ. Возможность плавной настройки коэффициента усиления огибающей достигается за счет применения двухкаскадного способа усиления (ОУ X9, ОУ X8 рис. 4). Коэффициент первого блока (ОУ X9) прямо пропорционален отношению сопротивлений R_4 и R_5 (R_4/R_5), а второго блока (ОУ X8) отношению сопротивлений R_2 и R_8 (R_2/R_8). Одним из широких классов сигналов, усиливаемых с помощью СВЧ усилителей на ЛБВ, являются узкополосные многочастотные сигналы. Было исследовано прохождение узкополосного двухчастотного тестового сигнала через СВЧ усилитель с премодуляцией тока электронного пучка. Коэффициент усиления разработанного усилителя был выбран исходя из наибольшего подавления нелинейных искажений и составил 14 дБ. Подборка коэффициента усиления осуществлялась с помощью переменных резисторов R_2 , R_4 , R_5 и R_8 . Изменение коэффициента усиления цепи обработки огибающей СВЧ сигнала не требовалось. Адаптивное изменение коэффициента передачи премодулирующей цепи может повысить эффективность подавления нелинейных искажений, но не является обязательным условием линеаризации характеристик СВЧ усилителя. Разработанный усилитель с помощью резисторов X7, X6 позволяет регулировать постоянную составляющую на своем выходе. Регулировка фазы огибающей возможна с помощью блока на основе ОУ X11 (рис. 4) или с помощью фазовращателя (рис. 2).

Проведен поиск оптимальных параметров цепи премодуляции тока электронного пучка и предварительные эксперименты по подавлению комбинационных составляющих при усилении двухчастотного сигнала с малым разносом частот составляющих около 1,1 кГц. Получено, что использование предлагаемого метода в этом случае позволяет уменьшить относительный уровень нелинейных искажений третьего порядка вблизи точки насыщения на величину до 6дБ.

Авторы благодарны Д.Л.Симонову за помощь модернизации экспериментальной установки и проведении измерений и К.А.Богачеву за помощь в тестировании усилителя огибающей.

Библиографический список

1. Спутниковые усилители на ЛБВ. Новости СВЧ-техники. М. 2002 №4. С. 4-10.
2. Солнцев В.А., Шульга А.И. // РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2012, том 57, № 2.
3. Малышенко В.И., Осин А.В., Солнцев В.А. // Электронная техника, сер. I, Электроника СВЧ, 1976, вып. 7, С.32.
4. Андреевская Т.М., Солнцев В.А. // Электрон. техн. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. № 4. С. 64.