

# Однополосная модуляция с контролем огибающей

Однополосная модуляция с контролем огибающей (CESSB) увеличивает среднюю излучаемую мощность без усиления эффекта ограничения сигнала.

**Dave Hershberger (W9GR)**

**“QEX” январь-февраль 2016 г, стр. 9-12.**

**Перевод на русский язык по заказу М. А. Могутова (RL3AA)**

Однополосная модуляция с контролем огибающей (CESSB) представляет собой новую систему обработки сигнала, позволяющая повысить средний уровень излучаемой мощности при сохранении пиковой величины (PEP) мощности излучения. Однополосная модуляция (SSB) характеризуется значительным уровнем всплесков амплитуды относительно огибающей сигнала. Для предотвращения искажений сигнала и «сплеттеров» традиционно использовалась система автоматического управления уровнем сигнала (ALC), которая уменьшала уровень излучаемой мощности до уровня, при котором пики сигнала проходили тракт УМ радиосигнала без ограничений амплитуды. Система CESSB снимает проблему возможного ограничения сигнала, устраняя пиковые всплески огибающей сигнала уже на стадии формирования. Сигнал CESSB формируется при помощи специальной системы ограничения сигнала на РЧ, что позволяет практически удвоить среднюю выходную мощность. Система CESSB не является аудиопроцессором, т.е. чем-то, что включено между микрофоном и передатчиком.

## **Введение**

Большинство высокочастотных усилителей мощности (УМ) имеют ограничения по пиковой мощности. Если пики сигнала велики по амплитуде, мы должны уменьшить среднюю амплитуду входного сигнала, чтобы УМ функционировал в штатном режиме. В том случае, если мы можем управлять величиной пиков сигнала и уменьшить их, соответственно появляется возможность поднять общую амплитуду сигнала и среднюю выходную мощность.

Возможно, вы думаете, что если ограничить на определенном уровне амплитуду входного звукового сигнала, поступающего в формирователь SSB сигнала, то огибающая выходного сигнала будет ограничена таким же образом. Это не так. Возможно, вы уверены, что ограничение сигнала в тракте ПЧ или РЧ даст искомый результат. И это не соответствует истине. Действительно, если мы подадим ограниченный звуковой сигнал в АМ или ЧМ передатчик, то огибающая выходного сигнала сохранит эту форму. В случае SSB сигнала это в корне неверно.

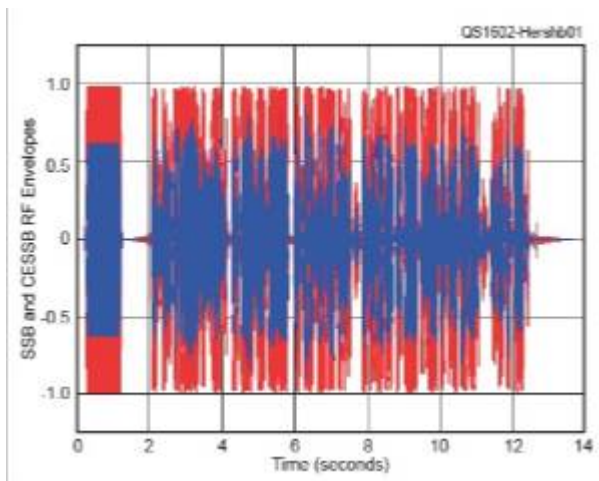


Рис.1 Стандартный SSB сигнал (синий) в сравнении с сигналом CESSB (красный) имеет одинаковый уровень PEP, но средняя мощность сигнала CESSB в 2.28 раза больше.

### Всплески при формировании SSB сигнала

На рис. 1 представлен синусоидальный тон звуковой частоты и далее речевой сигнал. Пики амплитуды звукового тона и ограниченного речевого сигнала имеют одну и ту же величину, однако после прохождения формирователя SSB сигнала это соотношение нарушается. Если вы подадите моночастотный сигнал в формирователь SSB сигнала, то вы всегда можете предсказать амплитуду выходного сигнала. Поднимая уровень этого сигнала до максимальной величины PEP, на которую способен ваш УМ, вы возможно подумаете, что нашли оптимальный пиковый уровень речевого сигнала для вашей передающей системы. Но это не так. Допустим, вы четко ограничили амплитуду речевого сигнала по НЧ, как показано на рис. 2, но как только вы подали ваш «красивый» сигнал в формирователь SSB, на выходе вы получите «сумасшедшие» пляски пиков сигнала (рис.3).

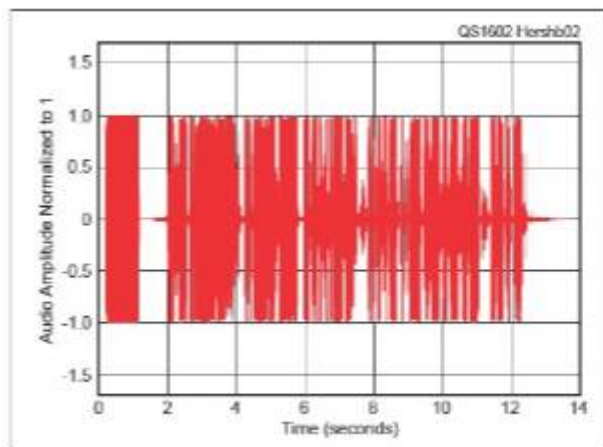


Рис. 2. Речевой сигнал строго ограниченный по амплитуде

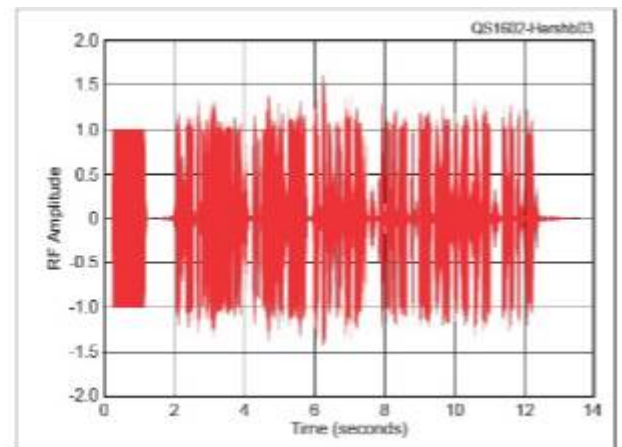


Рис. 3. Форма SSB сигнала после прохождения через формирователь SSB

Формирователи SSB сигнала «выстреливают» пиками, поскольку они используют преобразование Гильберта. В любом формирователе SSB сигнала используется преобразование Гильберта, в некоторых случаях оно присутствует в неявной форме. Преобразование Гильберта представляет собой сдвиг фаз всех модулирующих НЧ

сигналов на  $90^\circ$ . Этот «фазовый» метод формирования SSB сигнала использует преобразование Гильберта в явном виде с использованием фазосдвигающих цепей. (см. приложение «Преобразование Гильберта»). Амплитуда пиков тонального сигнала на рисунках 2 и 3 принята за единицу, и соответствует максимально допустимой пиковой мощности (PEP) последующего УМ. Максимальное значение пиков речевого сигнала на рис. 3 превышает установленный уровень на 61%. Это означает превышение пиковой мощности (PEP) в 2.59 раза. Таким образом, мы должны уменьшить подводимую мощность, чтобы предотвратить искажения выходного сигнала, связанные с его ограничением исключительно на пиках, возникающих при использовании преобразования Гильберта. Сдвиг фазы сигнала одной частоты не изменит его выходную амплитуду. Однако при одновременном сдвиге фаз сигналов многих частот, что характерно для речи, возникают продукты интермодуляционного взаимодействия частот, приводящие к образованию пиковых «выбросов» амплитуды сигнала.

Традиционная система ALC управляется по огибающей SSB сигнала. При обнаружении выбросов амплитуды РЧ сигнала, для предотвращения ограничения сигнала и возрастания уровня сплеттеров, усиление передающего тракта уменьшается. При этом реакция традиционной ALC достаточно замедлена. Первые выбросы амплитуды «пролезают» в тракт передачи, ограничиваются и производят сплеттеры, и только после этого ALC уменьшает усиление SSB тракта.

Современные технологии формирования SSB сигнала позволяют ограничивать амплитуду самого звукового сигнала. Тем не менее, когда мы подаем такой сигнал на формирователь SSB, амплитуда выбросов пиков сигнала значительно увеличивается, поэтому приходится использовать ALC, которая уменьшает усиление передающего тракта, чтобы избежать его нежелательного ограничения.

#### Ограничение («клиппирование») сигнала в тракте РЧ



Рис. 4. Стандартный ограничитель сигнала по РЧ

Ограничение сигнала в тракте РЧ помогает, но не решает проблему в целом. На рис. 4 показано, как достигается ограничение сигнала в тракте РЧ с использованием обычной аналоговой схмотехники. Сначала балансный модулятор выделяет две боковых полосы сигнала ПЧ, затем сигнал проходит через полосовой фильтр, формирующий однополосный сигнал. Точно так же, как и при фазовом методе формирования сигнала появляются пиковые выбросы сигнала. Затем мы ограничиваем сигнал уже по ПЧ. Соответственно, ограничение сигнала приводит к образованию внеполосных интермодуляционных продуктов, которые будут давать сплеттеры, если их не удалить. Таким образом, полученный сигнал пропускается еще через один полосовой фильтр, окончательно формирующий SSB сигнал. Проблема в том, что этот фильтр также порождает пиковые выбросы сигнала, причем тем большие, чем больше фактор ограничения сигнала. На рис. 5 изображен выходной сигнал ограничителя сигнала по РЧ.

Как видно, превышение амплитуды составляет 37% вместо 61%. Но превышение пиковой мощности (PEP) составляет 188%, т.е. практически вдвое больше желаемого. В компьютерной модели использовался фильтр с линейной фазовой характеристикой, но на практике аналоговые кварцевые или электромеханические фильтры должны иметь худшие характеристики из-за эффекта групповой задержки.

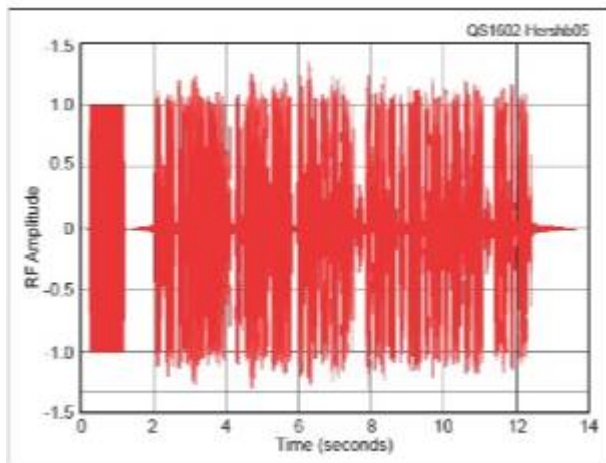


Рис.5. Форма SSB сигнала стандартного ограничителя по РЧ

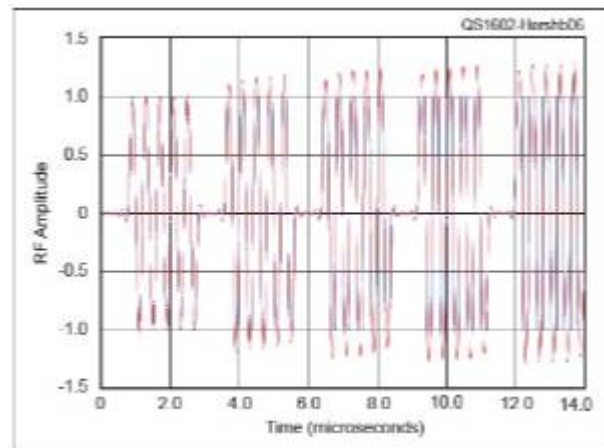


Рис.6. Эффект ограничения РЧ циклов 0, 3, 6, 10 дБ и полное ограничение

Амплитудные выбросы при стандартном методе ограничения сигнала на РЧ возникают из-за действия двух механизмов: спектрального «очищения» сигнала и ограничения амплитуды внутри цикла. Спектральное очищение представляет собой удаление внеполосных компонентов спектра, возникающих при ограничении сигнала. Ограничение сигнала по РЧ не ограничивает огибающую в целом. Скорее оно ограничивает амплитуду отдельных циклов сигнала. И в этом разница. Ограничение амплитуды по РЧ внутри цикла дает в пределе меандр. После прохождения через полосовой фильтр остаются только главные компоненты спектра. При этом пиковая амплитуда главной компоненты спектра меандра больше амплитуды самого меандра в  $4/\pi$  раза. Т.е. мы получим превышение амплитуды пика на 27% или на практике немного меньше, поскольку сигнал не представляет собой чистый меандр.

На рис. 6 представлены короткие выбросы ВЧ синусоиды при ограничении 0, 3, 6 и 10 дБ. А также меандра, который является предельным случаем ограничения синусоидальной волны. Красной отметкой показан сигнал на выходе фильтра нижних частот, который «отрезает» гармоники сигнала. Как видно, превышение амплитуды присутствует, поскольку главная гармоническая компонента (красная отметка) ограниченной синусоидальной волны имеет амплитуду, превышающую уровень ограничения самой синусоидальной волны (синяя отметка). При удалении гармоник, уровень этой компоненты уже не ограничивается. По этой причине ограничители сигнала по РЧ не могут работать достаточно эффективно. Проблема пиковых выбросов ограничителей по РЧ может быть снята путем замены ограничения отдельных периодов РЧ сигнала на ограничение огибающей модулирующего сигнала. Тем не менее, какой-то процент пикового превышения сигнала остается.

## Ограничение сигнала по огибающей модулирующего сигнала

Хотя ограничитель амплитуды сигнала по РЧ не решает проблему, ограничение сигнала по огибающей модулирующего сигнала является первым шагом к созданию CESSB. Ограничение по огибающей является улучшенной версией ограничителя по РЧ, но ограничение осуществляется на частотах модуляции, вместо ограничения на РЧ. Ограничение по огибающей модулирующего сигнала производится для двух сигналов звуковой частоты. Вместо ограничения амплитуды отдельных колебаний по РЧ производится непосредственное ограничение огибающей сигнала.

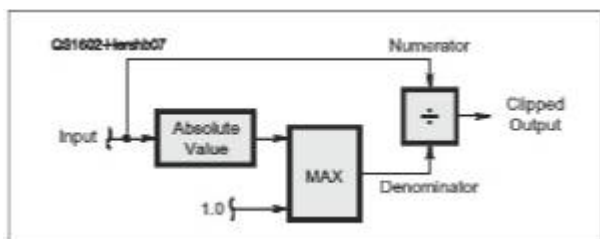


Рис.7. Ограничение с помощью деления.

На рис. 7 показана схема такого ограничителя, использующего делитель, отличный от диодного. Такой делитель является более сложным, чем схема на диодах, но он может быть применен для обработки двух комплексных (в математическом смысле) сигналов, необходимых для формирования SSB сигнала.

Нам потребуется абсолютное значение амплитуды входного сигнала, что может быть реализовано на двухпериодном выпрямителе. Далее использован функциональный блок, на выходе которого присутствует большее из двух сравниваемых входных значений. Это напоминает функцию максимум MAX, реализуемую функцией «ИЛИ» на диодах. Выход этого блока является знаменателем для следующего за ним блока деления. Числителем для блока деления является входной сигнал. Таким образом, если амплитуда входного сигнала заключена между -1 и +1, то происходит деление на 1 и выходной сигнал тождественен входному. Если, например, величина входного сигнала возрастет до 1.5 то и знаменатель в блоке деления возрастет до 1.5, и в результате деления даст единицу. Таким образом, сигнал окажется ограниченным.

Для единственного входного сигнала такой метод, безусловно, работает. Но в отличие от ограничителя на диодах такой метод может быть расширен для обработки пары комплексных (в математическом смысле) сигналов, используемых для формирования сигнала SSB. Эти два сигнала звуковой частоты ( $\alpha$  и  $\beta$ ) имеют сдвиг  $90^\circ$  и формируются соответствующей фазосдвигающей цепочкой.

На рис. 8 представлена схема ограничителя по огибающей модулирующего сигнала. В данном случае нашей целью является ограничение амплитуды огибающей SSB сигнала. Амплитуда огибающей представляет собой квадратный корень суммы квадратов амплитуд двух входных сигналов (функция модуля). Таким образом, мы получаем функцию, которая формирует огибающую на основе входных сигналов  $\alpha$  и  $\beta$ . Затем мы используем функцию MAX, которая выбирает либо 1, либо амплитуду огибающей, в зависимости от того, какая из них больше. Величина выходного сигнала является знаменателем для обоих делителей.

Когда мы делим сигналы  $\alpha$  и  $\beta$  на один и тот же знаменатель, то мы изменяем только длину результирующего вектора, но не его фазу.

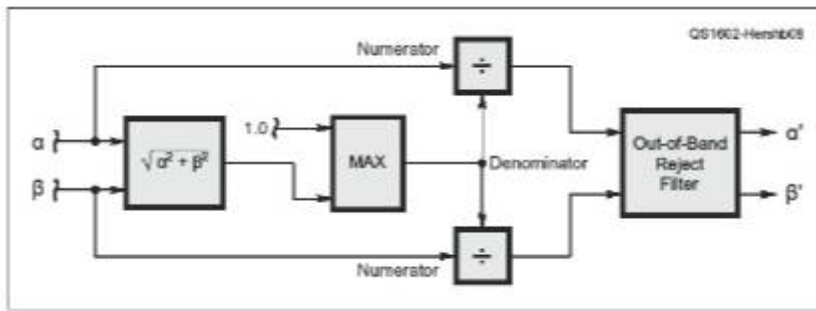


Рис.8. Ограничитель по огибающей модулирующего сигнала для комплексных сигналов.

После такого ограничения нам будет необходимо очистить получившую спектральную смесь от внеполосных компонентов с помощью фильтра. Такой метод не производит ограничения отдельных периодов РЧ сигнала, поскольку их нет, таким образом, элиминируются всплески амплитуды  $4/\pi$ , указанные ранее, но всплески амплитуды все равно имеют место.

Давайте посмотрим на систему ограничения сигнала по огибающей модулирующего сигнала в работе. На рис. 9 представлена амплитуда огибающей обычного SSB сигнала, при формировании которого использовалось стандартное ограничение речевого сигнала. Как и в предыдущем случае – начало графика – единичный тон звуковой частоты. Амплитуда всплесков сформированного SSB сигнала превышает 59%. На рис. 10 представлен результат пропускания такого сигнала через ограничитель сигнала по огибающей, использующий операцию деления.

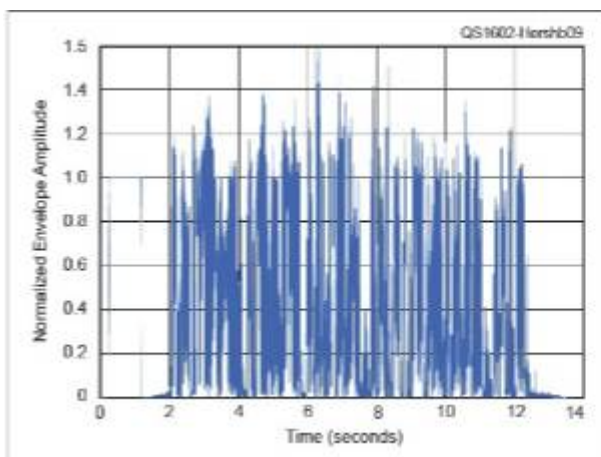


Рис.9. Огибающая SSB сигнала после ограничения по НЧ имеет 59.4% всплески

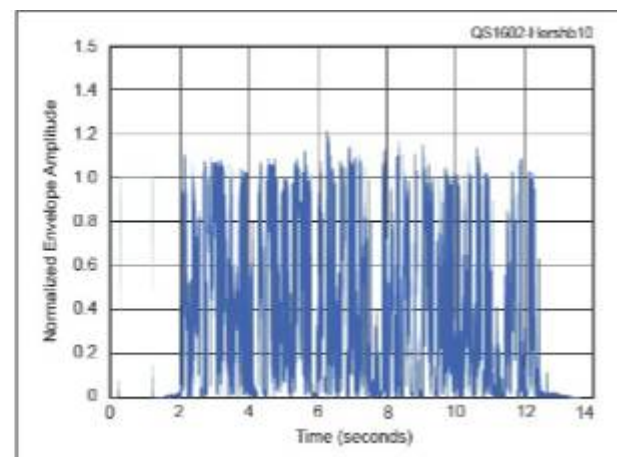


Рис.10. Огибающая SSB после огибающей имеет 21.4% всплески

Такой ограничитель уменьшает амплитуду всплесков в большой степени – до 21.4%. Тем не менее, всплески по мощности в этом случае составляет 47%. Если мы пропустим сигнал через второй подобный ограничитель с контролем огибающей, то амплитуда

всплесков уменьшится до 10.3%. Соответственно, третий ограничитель даст результат 7.1%. Четвертый, пятый, шестой и седьмой ограничители уменьшат всплески до 4.95%, 3.98%, 3.43% и 2.97% соответственно. Скорость сходимости к единичной точке падает с ростом числа ограничителей.

Семь последовательно соединенных ограничителей дадут нам практически желаемый результат, но цена обработки сигнала будет очень высока. Такой метод не может считаться практичным при использовании аналоговых схемных решений, а цифровые методы также оказываются достаточно затратными.

### Управление огибающей SSB сигнала

Теперь мы подходим к «тайной фишке» метода CESSB. Нам необходимо нечто большее, чем простое ограничение сигнала. Поскольку мы можем управлять «знаменателем» в делителях устройства, то мы можем создать такую функцию, которая уменьшает выходной сигнал делителя в несколько большей степени, чем это необходимо при «простом» ограничении. После подобного усовершенствования, мы можем довести амплитуду всплесков огибающей сигнала до очень низких значений за одно «преобразование». Собственно это и является основной идеей CESSB.

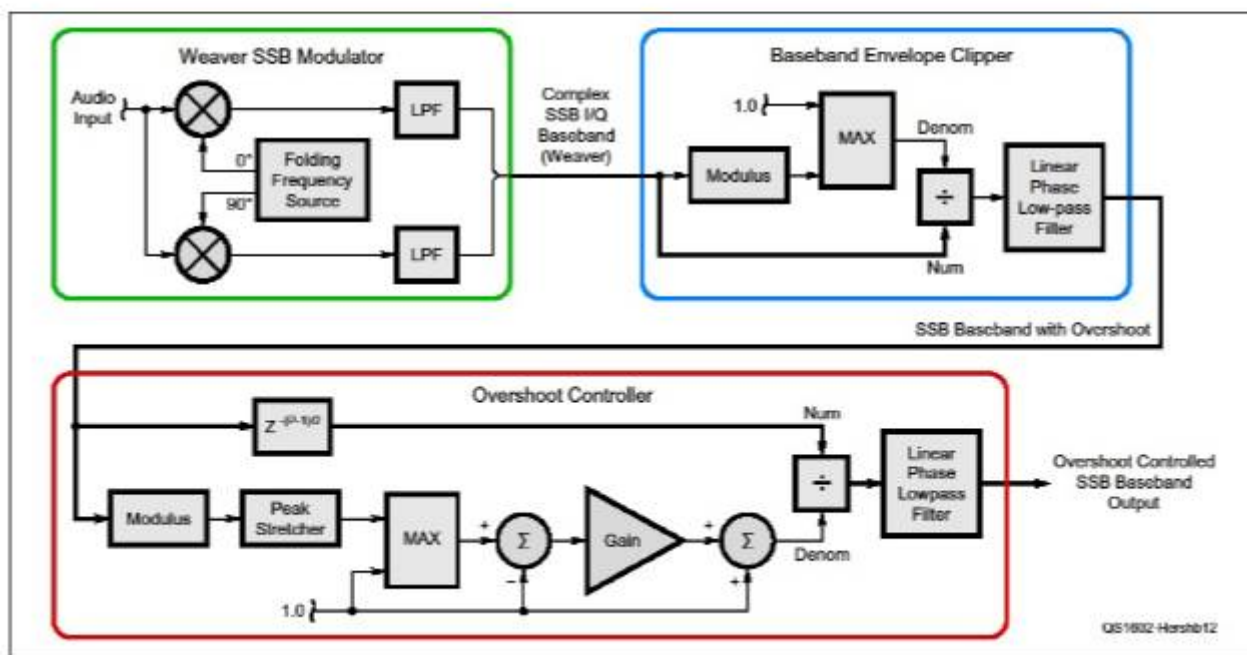
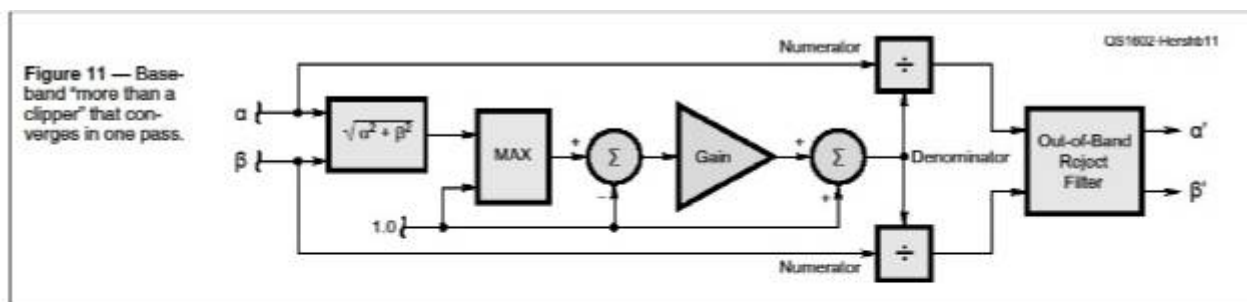


Рис.12. Полная блок-схема CESSB

На следующем шаге мы корректируем всплески огибающей ограничителя. На рис. 11 показана схема усовершенствованного ограничителя по огибающей модулирующего сигнала. Такая схема позволяет уменьшить усиление во время всплесков сигнала в большей степени, чем позволяет обычный ограничитель. Значение коэффициента усиления на блок схеме порядка 2. Таким образом, например, когда превышение сигнала составит 1.2, то на приведенной блок схеме коэффициент деления будет равен 1.4, т.е. амплитуда выходного сигнала будет меньше, чем при обычном ограничении. Мы берем коэффициент 1.2 (превышение сигнала), вычитаем единицу, получаем 0.2, которое умножаем на 2 и получаем 0.4. Прибавляя к единице, получаем в итоге 1.4. Таким образом, на выходе уменьшение амплитуды составит 1.4 раза вместо 1.2, но только *на время* всплеска амплитуды. В этом состоит «секрет» «сверх» ограничения.

На рис. 12 представлена полная блок схема системы CESSB от аудиовхода до пары выходных модулирующих сигналов, в которой решена проблема всплесков огибающей модулирующего сигнала. Утолщенные линии на блок схеме рис. 12 представляют пути комплексных (двойных) сигналов, обычные тонкие линии показывают пути прохождения действительных (одиночных) сигналов. Соответственно делители на блок схеме являются комплексными, т.е. на каждой стадии имеется два делителя, один для каждой компоненты сигнальной пары.

На рис. 12 имеется три основных функциональных блока. На вход устройства подается аккуратным образом ограниченный сигнал звуковой частоты. Первый блок является обычным формирователем SSB сигнала (зеленый блок), представляющий собой фазовый SSB модулятор. Принцип фазовой генерации SSB сигнала особенно эффективен при использовании DSP. Выход формирователя SSB сигнала подключен ко входу ограничителя по огибающей модулирующего сигнала (синий блок). Ограничитель удаляет большинство всплесков сигнала после формирователя SSB. Наконец, есть блок «сверх» ограничения (красный блок), компенсирующий большинство всплесков огибающей, генерируемых ограничителем по огибающей модулированного сигнала. Однополосные сигналы, не достигающие значения полной пиковой мощности PEP или 100% огибающей проходят синий и красный блоки без изменений. Т.е. CESSB не реагирует на такие сигналы. Реакция начинается только при наличии выбросов амплитуды в формирователе SSB сигнала.

Заметим, что последним элементом в блок схеме является модуляционный фильтр нижних частот. Он соответствует полосовому фильтру ПЧ или РЧ. Последний фильтр должен жестко обеспечивать необходимую полосу частот CESSB. Мы увидим, что амплитуда выходного сигнала также хорошо контролируется.

На рис. 9 и 10 показаны промежуточные сигналы системы CESSB. На рис. 9 показана форма сигналов на выходе стандартного формирователя SSB сигнала. Всплески амплитуды составляют 59% (или 253% по мощности относительно мощности эталонного тонального сигнала). На рис. 10 отображен выходной сигнал ограничителя по огибающей модулирующего сигнала. Всплески амплитуды составляют 21% (или 146% относительно мощности эталонного тона).

Наконец, на рис. 13 изображен выходной сигнал CESSB. Всплески амплитуды только 1.6% (103% по мощности). Полоса сигнала ограничена и очищена выходным полосовым



фильтром. Амплитуда также тщательно ограничена. Это то, что мы и хотели – чистый и громкий сигнал при отсутствии сплеттеров.

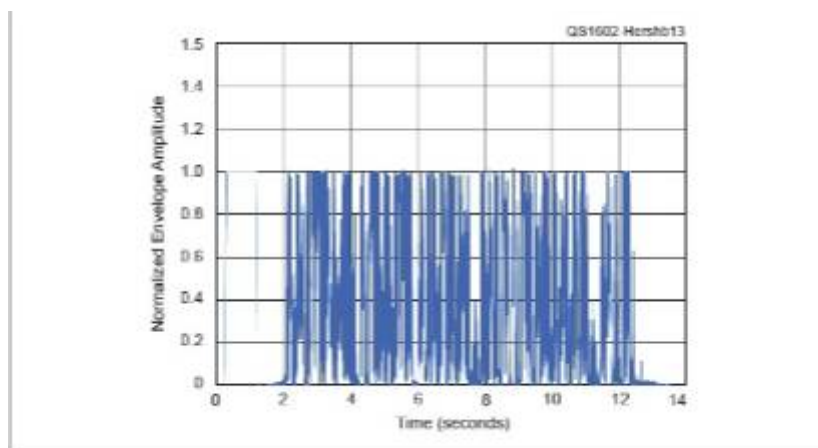


Рис.13. Огибающая сигнала CESSB на выходе ограничителя огибающей модулирующего сигнала с эффектом «сверх» ограничения (клиппирования).

Два сигнала, показанные на рис. 1 демодулированы в звуковые сигналы. Эти два звуковых файла – сравнение обычного SSB сигнала и сигнала CESSB выложены в QST (1). Аудиофайл стандартного SSB сигнала **conventionalSSB.wav**. Сигнал CESSB в файле **ceSSB.wav**. Эти два звуковых файла сохраняют амплитудные соотношения двух сигналов рис. 1. Пиковая мощность PEP обоих сигналов одинакова, но выход CESSB звучит заметно громче. Моделирование для этой статьи было выполнено программой GNU octave (2).

Я опустил некоторые детали и нюансы системы CESSB, их можно найти в ноябрьском и декабрьском номерах QEX за 2014 год (3).

### Практические соображения

По существу можно сказать следующее:

(1). При использовании системы CESSB средняя мощность передатчика может быть повышена вдвое при сохранении уровня пиковой мощности PEP.

(2). При использовании CESSB система ALC становится ненужной, поскольку CESSB управляет огибающей. Достаточно формирователя CESSB для раскачки УМ до максимально допустимой PEP. Если ALC включено, то хуже не будет, к тому же ALC поможет выставить правильный уровень раскачки УМ.

(3). УМ не должен испытывать температурный перегрев, поскольку УМ сконструирован так, что максимальный КПД (эффективность) достигается при максимуме пиковой мощности (PEP). Если уровень возбуждения (раскачки) уменьшить, что бывает необходимо для обычного SSB сигнала, то тепловое рассеяние УМ может возрасти! При небольшом уменьшении мощности потребляемый ток несколько уменьшится, но напряжение на лампах или транзисторах может возрасти более чем вдвое. Результатом может быть увеличение теплового рассеяния при мощностях, несколько меньших максимальной PEP.

(4). Возможен выход из строя блока питания УМ. Поскольку средняя мощность увеличивается, то увеличивается нагрузочная мощность блока питания. Недостаточный запас по мощности может привести к перегреву блока питания или к более тяжелым последствиям. Подходящим может считаться БП, способный выдержать нагрузку в режиме несущей.

(5). Система CESSB подразумевает перестройку всей системы формирования однополосного сигнала. Современные способы формирования SSB сигнала не предполагают тщательной обработки сигнала НЧ по огибающей модулирующего сигнала, поскольку уровень всплесков амплитуды в стандартных формирователях SSB достаточно высок. Таким образом, в современных аппаратах делается ставка на ALC и иногда на ограничение сигнала по РЧ. Как мы уже показали, данные технологии реально не являются достаточно эффективными. С помощью CESSB обработка аудиосигнала может и должна быть возвращена в блок формирования сигнала модуляции. Современные методы обработки сигнала, а именно многополосное разделение сигнала в совокупности с ограничителями сигнала с компенсацией искажений, используемые в практике радиовещания, могут показать гораздо лучшие результаты, чем обычное широкополосное ограничение сигнала по РЧ. Я думаю, появятся новые хорошие алгоритмы обработки речевого сигнала, которые в сочетании с системой CESSB позволят формировать свободные от всплесков сигналы.

(6). Ваш SSB сигнал будет звучать громче без эффекта дополнительной «компрессии».

CESSB является системой, которая должна быть встроена (или в крайнем случае, предусмотрена) в трансивер с самого начала. Если позволяет программное обеспечение аппарата, то для «вживления» CESSB необходимо написать новую программу. CESSB интегрировано в прошивку FlexRadio серии 6000 с лета 2014 года. FlexRadio провело лабораторные и полевые испытания, для подтверждения эффективности работы CESSB.

TAPR создал семейство плат, которые вы можете использовать для создания вашего «программного» радио. Warren Pratt, NR0V написал программу CESSB для открытой библиотеки HPSDR для плат TAPR.

CESSB может быть встроена также в новые аппараты и других фирм. Я разместил технологию на публичном домене, и, в частности, на «любительском домене» безвозмездно.

### **Переоснащение через CESSB**

Теоретически возможно переоснастить (модифицировать) существующие аппараты для установки CESSB, однако на практике это достаточно сложно. Система CESSB неизбежно сильно интегрирована с формирователем SSB сигнала. Однако, в некоторых специальных случаях обработку CESSB можно производить внешним образом. Старые аналоговые аппараты в общем имеют нелинейности по фазе, поэтому я не думаю, чтобы в аппаратах типа Heathkit HW-101 система CESSB нашла бы применение.

Смотрите также «внешняя обработка однополосных сигналов с контролем огибающей» в январском и февральском выпусках QEX (6) за 2016 год, где описаны детали таких процессоров.

### **Заключение**

Сигнал SSB может быть сформирован таким образом, что всплески амплитуды сигнала не будут превышать определенный максимальный уровень пиковой мощности PEP. Это позволяет увеличить уровень средней мощности, не превышая при этом максимальный уровень PEP. Используемая техника обработки нелинейна, однако практически не воспринимается на слух, т.е. сигнал при такой обработке не кажется более «процессированным». Устройство включает стандартный ограничитель сигнала по огибающей модулирующего сигнала, и затем второй ограничитель сигнала, имеющий мгновенный коэффициент усиления в заданное число раз меньший, чем стандартный ограничитель. Такая схема эквивалентна последовательному включению семи или более устройств ограничителей.

Система CESSB предназначена для обработки речи. При использовании цифровых видов связи, особенно с плавающей огибающей, для уменьшения нелинейных искажений, систему CESSB необходимо отключить.

### **Примечания**

- (1). Два аудиофайла доступны [www.arrl.org/qst-in-depth](http://www.arrl.org/qst-in-depth)
- (2). Информация и последняя версия GNU Octave доступна [www.gnu.org/software/](http://www.gnu.org/software/)
- (3). D.L/ Hershberger, W9GR, “Controlled Envelope Single Sideband”, QEX Nov/Dec 2014, pp 3-13, [www.arrl.org/files/file/QEX\\_Next\\_Issue/2014/Nov-Dec\\_2014?Hershberger\\_QEX\\_11\\_14.pdf](http://www.arrl.org/files/file/QEX_Next_Issue/2014/Nov-Dec_2014?Hershberger_QEX_11_14.pdf)
- (4). S. Cowling, WA2DFI “The High Performance Software Defined Radio Project”, QEX, May/June 2014, pp 3-13.
- (5). TAPR openHPSDRlibrary project ([openhpsdr.org/](http://openhpsdr.org/))
- (6). D.L. Hershberger, W9GR, “External Processing for Controlled Envelope Single Sideband.” QEX, Jan/Feb 2016, pp 11-14.

## Приложение

### Преобразование Гильберта

Всплески амплитуды в формирователях SSB сигнала происходят вследствие применения преобразования Гильберта (групповой сдвиг фаз на  $90^\circ$  всех частот входного аудиосигнала в пределах его диапазона). Преобразование Гильберта присутствует в любом SSB передатчике. Преобразование Гильберта превращает четко ограниченный входной сигнал в смесь частот, имеющих значительные выбросы амплитуды. Таким образом огибающая РЧ сигнала также имеет выбросы амплитуды.

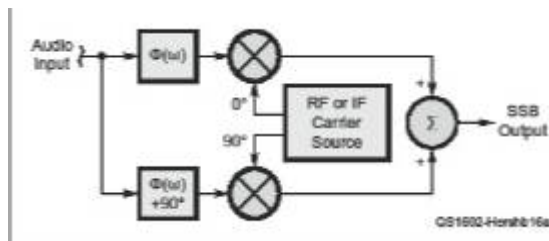


Рис. А. Формирование SSB сигнала фазовым методом

На рис. А изображен фазовый метод получения SSB сигнала, который использовался в самых ранних SSB передатчиках, таких как Hallicrafters HT-37. Некоторые из современных аппаратов с DSP также используют этот способ. На рис. А мы разделяем входной аудиосигнал, который имеет фазу в зависимости от частоты  $\phi(\omega)$  по двум каналам. В одном канале фаза сигнала  $\phi(\omega)$  сохраняется, тогда как в другом канале сигнал проходит через  $\phi(\omega) + 90$  градусную фазосдвигающую цепочку. Выход второго канала и есть преобразование Гильберта сигнала первого канала. Затем мы подаем эти выходные сигналы на два смесителя возбуждаемые по квадратуре (сигналы опорного генератора ПЧ или РЧ сдвинуты на  $90^\circ$  друг относительно друга), сумма которых даст искомый SSB сигнал.

Формирователь SSB фильтрового типа использует преобразование Гильберта в неявном виде. Представьте случай, когда вы принимаете SSB сигнал, и опорный генератор находится на «правильной» частоте. Если фазу опорного генератора сместить на  $90^\circ$ , то фаза всех протектированных звуковых частот также сместится на  $90^\circ$ . Это и есть преобразование Гильберта. Компоненты I и Q SSB сигнала (т.е. синфазный и квадратурный сигналы) любого SSB сигнала всегда связаны через преобразование Гильберта. Преобразование Гильберта имеет практически плоскую частотную характеристику. При этом фазовая характеристика изменяется в зависимости от того как складываются или вычитаются отдельные частоты, что составляет проблему. Если какие либо частотные компоненты сигнала вычитались, то после преобразования Гильберта они могли сложиться, порождая новый всплеск амплитуды.

## Огибающая SSB сигнала прямоугольной формы (меандра).

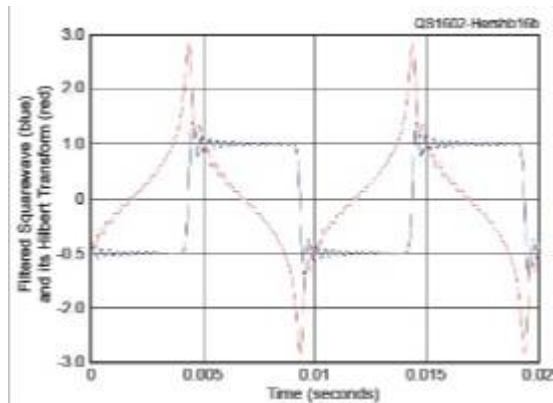


Рис. В. Внутриполосный сигнал прямоугольной формы (синяя кривая) и его преобразование Гильберта (красная кривая)

Самый худший случай преобразования Гильберта это преобразование сигнала прямоугольной формы. На рис. В представлен ограниченный по полосе прямоугольный сигнал частотой 100 Гц (синяя кривая) и его преобразование Гильберта (красная кривая). Сигнал прямоугольной формы представляет собой сумму синусоидальных гармоник, имеющих общие нули. После преобразования Гильберта эти синусы превратятся в косинусы (сдвиг фазы на  $90^\circ$ ) и гармоники будут совпадать не в нулях, а на максимумах (пиках). По этой причине форма сигнала после преобразования Гильберта приобретет такую «заостренную» форму (красная кривая на рис. В). Превышение амплитуды составит более 200 %. Это важный факт, объясняющий возникновение всплесков амплитуды SSB сигнала при тщательном его ограничении по НЧ. Среднеквадратичное значение (т.е. средняя мощность) для обоих сигналов одинакова, однако всплески амплитуды сильно различны.

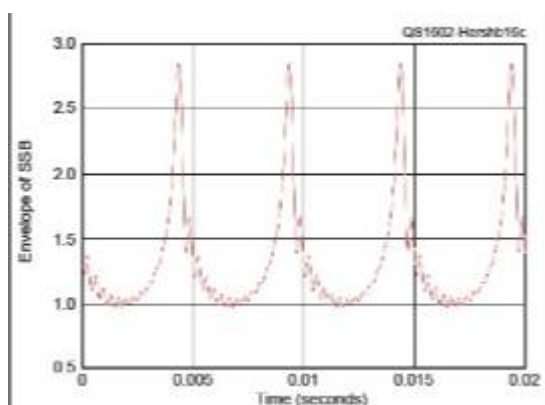


Рис. С. Огибающая SSB ограниченного в пределах полосы сигнала прямоугольной формы, изображенного на рис. В.

На рис. С показана огибающая SSB сигнала с отфильтрованным сигналом прямоугольной формы на входе. Величина амплитуды более 1.0 считается превышением. Как видно превышение амплитуды наблюдается практически все время, причем всплески амплитуды превышают 200 %.

## Всплески огибающей SSB речевого сигнала

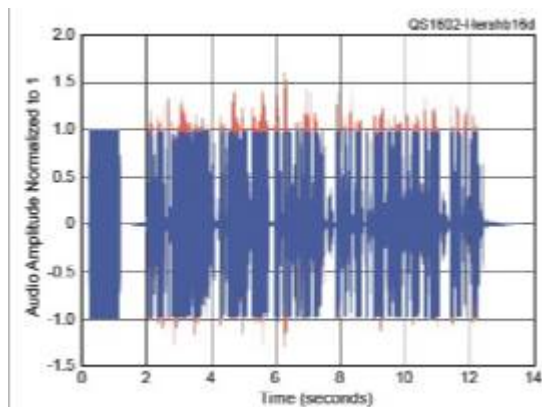


Рис. D. Ограниченный речевой сигнал (синяя кривая) и его преобразование Гильберта (красная кривая).

Обычно нам не требуется передавать сигналы прямоугольной формы. На рис. D показано, что происходит при передаче речи. Синяя кривая – входной речевой НЧ сигнал после НЧ компрессии и пикового ограничения. Начало графика – отдельный звуковой тон, принимаемый за 100 % модуляции, т.е. уровень сигнала, соответствующий максимально допустимой пиковой мощности PEP усилителя мощности РЧ. Обратите внимание, что уровень модулирующего НЧ сигнала не превосходит 100% уровня модуляции.

Красная кривая – выходной сигнал после фильтра преобразования Гильберта. Фазы всех входных сигналов (синяя кривая) были сдвинуты на 90 °. Наш сигнал, хорошо ограниченный по пикам амплитуды, перестал таковым являться. Для данного примера речевого сигнала превышение амплитуды составило 59%. Произошло значительное «размазывание» формы сигнала на выходе преобразования Гильберта. Произошло некоторое ассиметричное изменение формы входного сигнала.

Обратите внимание, что эталонного тона в начале графика всплесков амплитуды не обнаружилось. Это объясняется тем, что тон представляет собой синусоидальный сигнал одной частоты. Всплески амплитуды наблюдаются только при наличии сигналов различных частот, когда сдвиг фазы порождает новые точки суммарной или разностной интерференции различных частотных компонентов. Иными словами, сдвиг фазы сигнала одной частоты не вызывает всплесков амплитуды, тогда как сдвиг фаз поличастотного сигнала приводит к их появлению.