

Высокоскоростной детектор и ультра малошумящий предусилитель с нулевой квадратурной ПЧ Dan Tayloe, N7VE

Резюме:

Квадратурный детектор Tayloe обладает четырьмя уникальными свойствами:

- Менее 1 дБ потерь преобразования
- «Свободная» селективность полосы пропускания слежения ($Q = 3500$ при 7 МГц) с определяемой пользователем полосой пропускания
- Высокий перехват 3-го порядка (+30 дБм).
- Чрезвычайно компактная и простая конструкция по сравнению с другими квадратурными детекторами I-Q с нулевой ПЧ.

Верхний предел частоты детектора продукта устанавливается способностью полевого транзистора включаться только на четверть цикла входящего радиочастотного сигнала, преобразуемого в полосу частот модулирующих сигналов. Максимальная полезная частота для этого детектора легко расширяется как минимум до 10 ГГц.

Сопутствующий квадратурный повышающий преобразователь I-Q чрезвычайно прост и позволяет преобразовывать квадратурные сигналы полосы частот в радиочастоту с незначительными потерями преобразования.

Tayloe Quadrature Product Detector

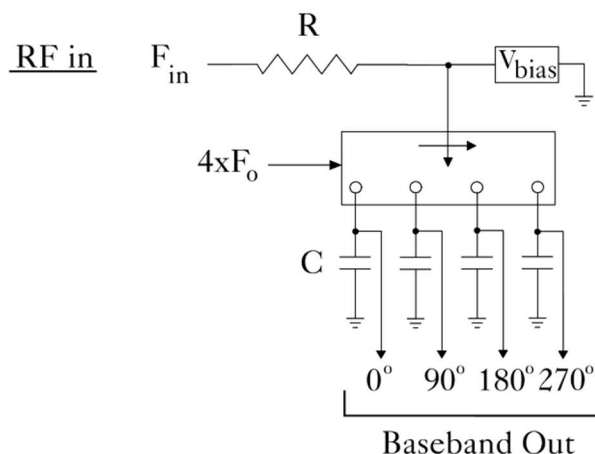


Figure # 1 Tayloe Quadrature Product Detector

Basic Detector Operation

Базовый детектор продукта показан на рисунке № 1. Обратите внимание, что детектор чрезвычайно прост по конструкции. Входящий радиочастотный сигнал направляется через общий резистор R и коммутирующий радиочастотный мультиплексор на один из четырех конденсаторов C , обнаружения. Этот мультиплексор 1 из четырех коммутируется со скоростью, в четыре раза

превышающей желаемую частоту обнаружения. 4-кратная коммутирующая частота заставляет каждый конденсатор видеть четверть цикла входного радиочастотного сигнала на желаемой частоте обнаружения.

Смесители обычно выдают сумму и разность выходов. В приложениях с нулевой ПЧ используется разностная частота, а сумма отбрасывается. Таким образом, потери преобразования с использованием идеального смесителя составляют не менее 3 дБ, при типичных потерях преобразования 4-6 дБ на практике.

Наоборот, эта конструкция не является смесителем, а скорее может быть лучше всего описана как «коммутирующий интегратор», вырабатывающий только разностную частоту. Вход R и конкретный детектор C действуют вместе как интегратор, усредняя сигнал по выборке четверти цикла для конденсатора обнаружения. Рисунок № 2 показывает синусоидальную волну, которая имеет ту же частоту, на которую настроен детектор, и с выравниванием фаз, которое даст максимальное положительное напряжение на первом конденсаторе, ноль вольт на втором и четвертом конденсаторах и максимальное отрицательное напряжение на третьем конденсаторе.

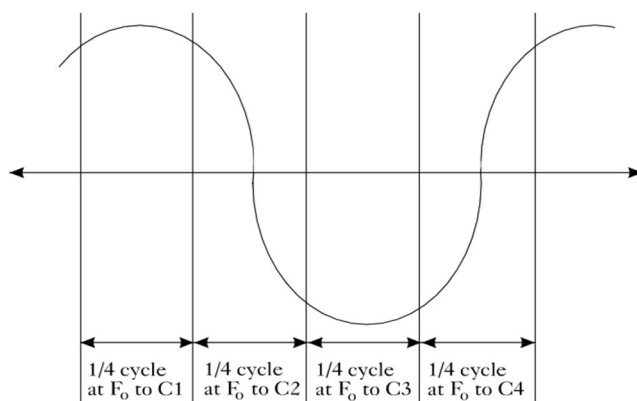


Figure # 2 One cycle Sine Wave at Sampled Frequency F_0

Выполнение интегрирования по пиковой четверти цикла этой синусоиды показывает, что максимальное обнаруженное напряжение будет приблизительно в 0,9002 раза больше пикового напряжения синусоиды. Следовательно, потеря обнаружения составляет около 0,9 дБ.

Если частота входящего сигнала немного смещена от точной частоты обнаружения, результирующие напряжения на конденсаторах обнаружения больше не будут стационарными, а будут дрейфовать со временем, следуя разностной частоте между входящим сигналом и частотой обнаружения.

Короче говоря, первый конденсатор становится детектором продукта основной полосы пропускания, производящим выборку при 0 градусах, а другие конденсаторы обнаружения производят обнаружение при 90, 180 и 270 градусах соответственно.

Выходы 180 и 270 градусов несут информацию, которая избыточна по сравнению с выходами 0 и 90 градусов.

Поэтому выходы 0 и 180 градусов можно суммировать дифференциально для получения одного составного синфазного («I») сигнала, а 90 и 270 можно аналогичным образом объединить для формирования квадратурного («Q») сигнала. См. рисунок #3. Это дифференциальное суммирование можно выполнить с использованием маломощных операционных усилителей или инструментальных усилителей.

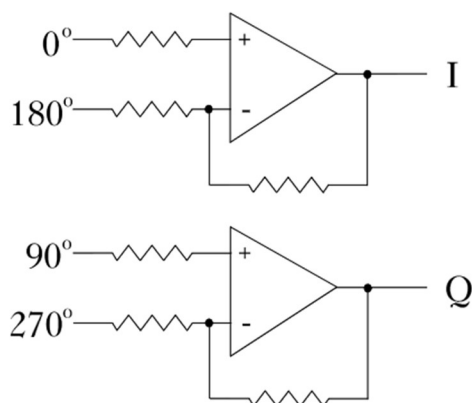


Figure # 3 Using Op-amps to Derive I and Q from Four Phase Quadrature Signals

Полоса пропускания

Детектор имеет частотный спад, который можно установить, правильно выбрав R и C. Вместе R и C действуют как фильтр нижних частот в основной полосе частот. Однако при расчете частотного спада необходимо учитывать все компоненты последовательного сопротивления. См. рисунок № 4. Обратите внимание, что эквивалентное последовательное сопротивление — это не только вход фильтра R, но также включает в себя входной импеданс системы, R_{sys} , и сопротивление переключателя R_{switch} .

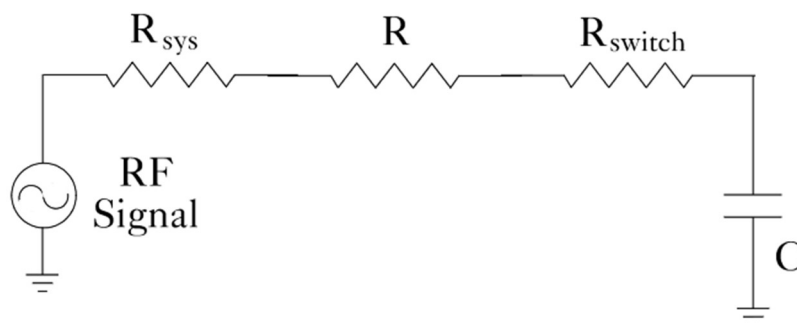


Figure # 4 Total System Input Impedance

Поскольку каждый конденсатор детектора видит вход только четверть времени, эффективное сопротивление, используемое в расчете фильтра нижних частот, составляет: 4 раза ($R_{sys} + R + R_{switch}$).

Предположим, что для приемника 7 МГц требуется полоса пропускания обнаружения 1 кГц. Если R_{sys} составляет 50 Ом, а R и R_{switch} предполагаются равными нулю, обнаружение C в 1,33 мкФ дает полосу пропускания фильтра нижних частот 3 дБ в 1 кГц.

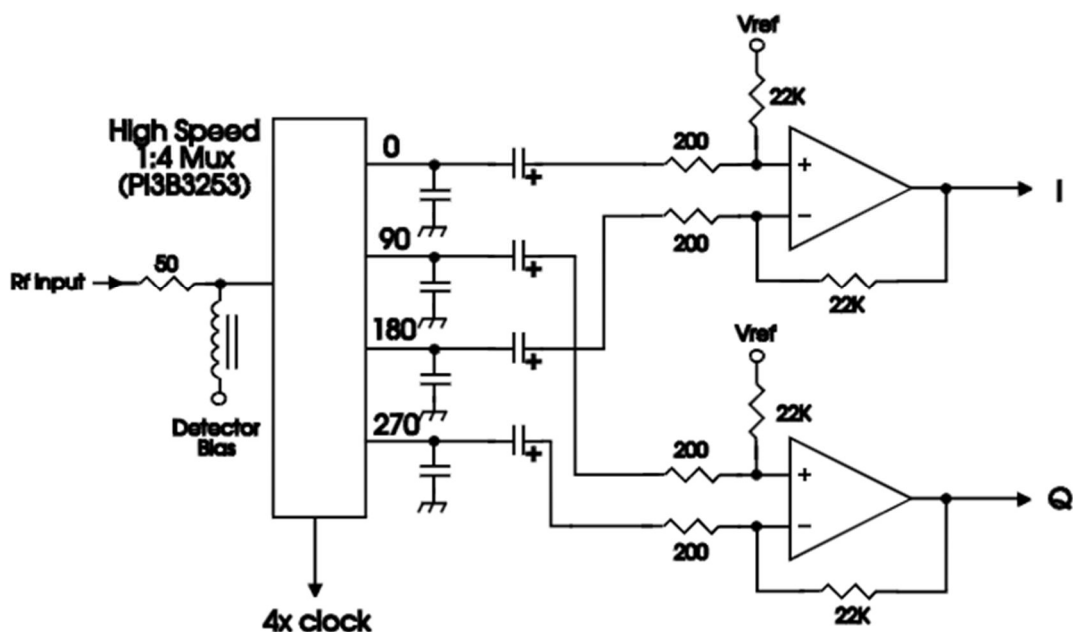
Обратите внимание, что фактическая полоса пропускания обнаружения составит 2 кГц, поскольку спад нижних частот будет распространяться на обе стороны от центральной частоты обнаружения. Однако выбор 01,33 мкФ приведет к тому, что края будут на 3 дБ ниже, поэтому фактический выбор C будет зависеть от потенциального компромисса в отбраковке соседнего канала широкой полосы и спада фактического сигнала на краю обнаружения.

Обратите внимание, что полоса пропускания обнаружения отслеживает частоту, на которую настроен детектор. Несмотря на то, что спад представляет собой только один полюс R/C в базовой

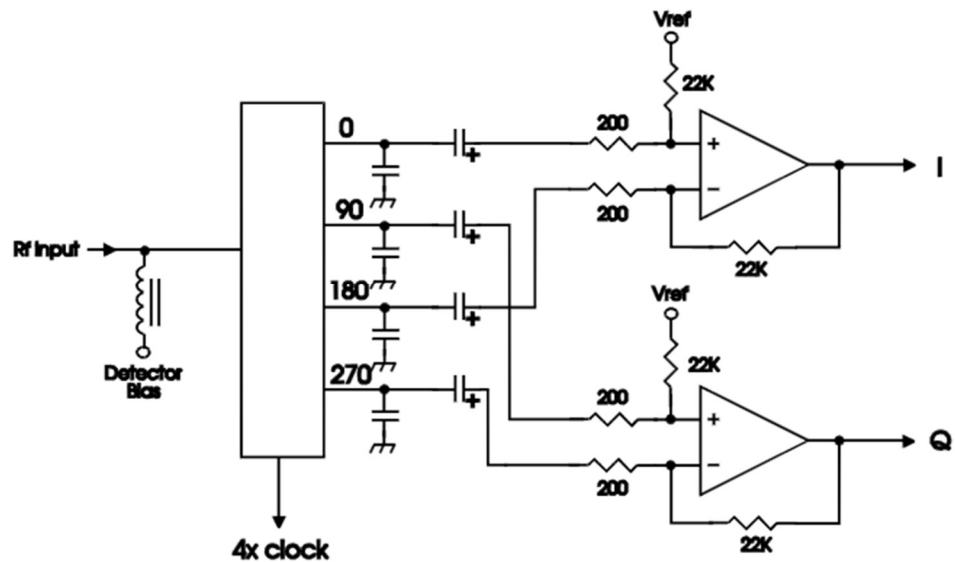
полосе, полоса слежения 2 кГц на частоте 7 МГц эквивалентна однополюсной настроенной схеме Q 3500. На частоте 28 МГц та же полоса слежения 2 кГц дает Q 14 000.

Обычно приемник предназначен для выбора одного сигнала из ряда сигналов, распределенных по желаемому частотному спектру. Для того чтобы детектор и последующие каскады защищали от нежелательных внеполосных сигналов, полосовая фильтрация часто используется в качестве первого каскада на входе приемника. Эта полосовая фильтрация обычно настроена фиксированно и, как таковая, не обеспечивает внутри полосной защиты от других сигналов в пределах желаемого частотного диапазона. Напротив, селективность, обеспечиваемая этим детектором, сосредоточена вокруг частоты обнаружения. Таким образом, селективность, которую он обеспечивает, превосходит ту, которую обеспечивает широкополосная полосовая фильтрация, обеспечивая некоторый запас «свободной» селективности как по соседним каналам, так и по внеполосным сигналам. В некоторых случаях эта встроенная селективность может значительно снизить или даже свести на нет необходимость в полосовой фильтрации входного сигнала приемника и связанных с ней дополнительных вносимых потерях. Однако, как минимум, требуется фильтрация нижних частот для защиты смесителя от обнаружения гармоник желаемой частоты, особенно второй (-40 дБ вниз) и нечетных гармоник. Этот фильтр нижних частот обычно требуется для устранения гармоник от связанного передатчика и обычно имеет минимальные вносимые потери на частоте передачи. Благодаря использованию передатчиком и приемником одного и того же фильтра нижних частот можно минимизировать как общую стоимость системы, так и вносимые потери входного сигнала приемника.

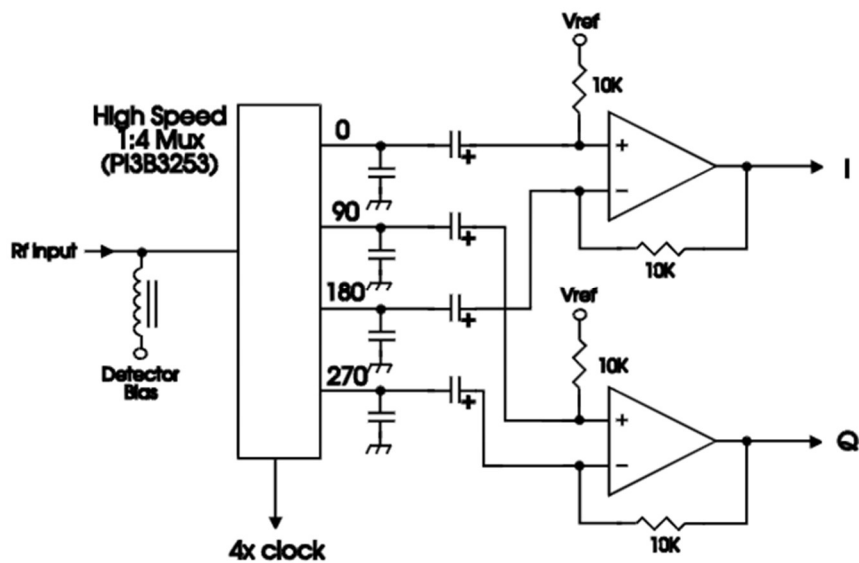
Detection Noise – A Design Evolution



Приведенная выше схема представляет собой первую эволюцию детектора Tayloe, подключенного к операционному усилителю предусилителя пост детектора. Обратите внимание, что предусилитель подключен к детектору по переменному току. Учитывая, что резисторы генерируют нежелательный шум, ухудшая конечную чувствительность приемника, конструкция прошла несколько эволюционных этапов, чтобы уменьшить зависимость от резисторов на критическом пути от антенны до дифференциальных входов предусилителя.

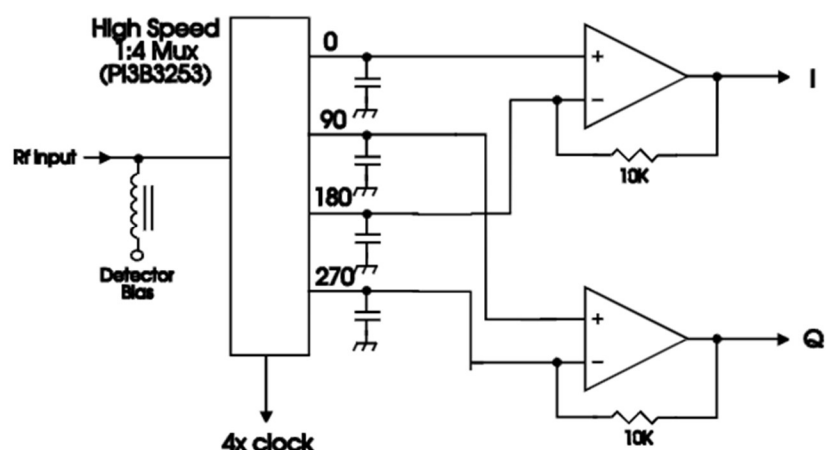


На этом этапе входной резистор 50 Ом был исключен. Таким образом, полоса пропускания обнаружения теперь в первую очередь является функцией входного сопротивления системы, которое здесь предполагается равным 50 Ом. Исключение этого сопротивления и уменьшило потери, и снизило уровень входного шума.



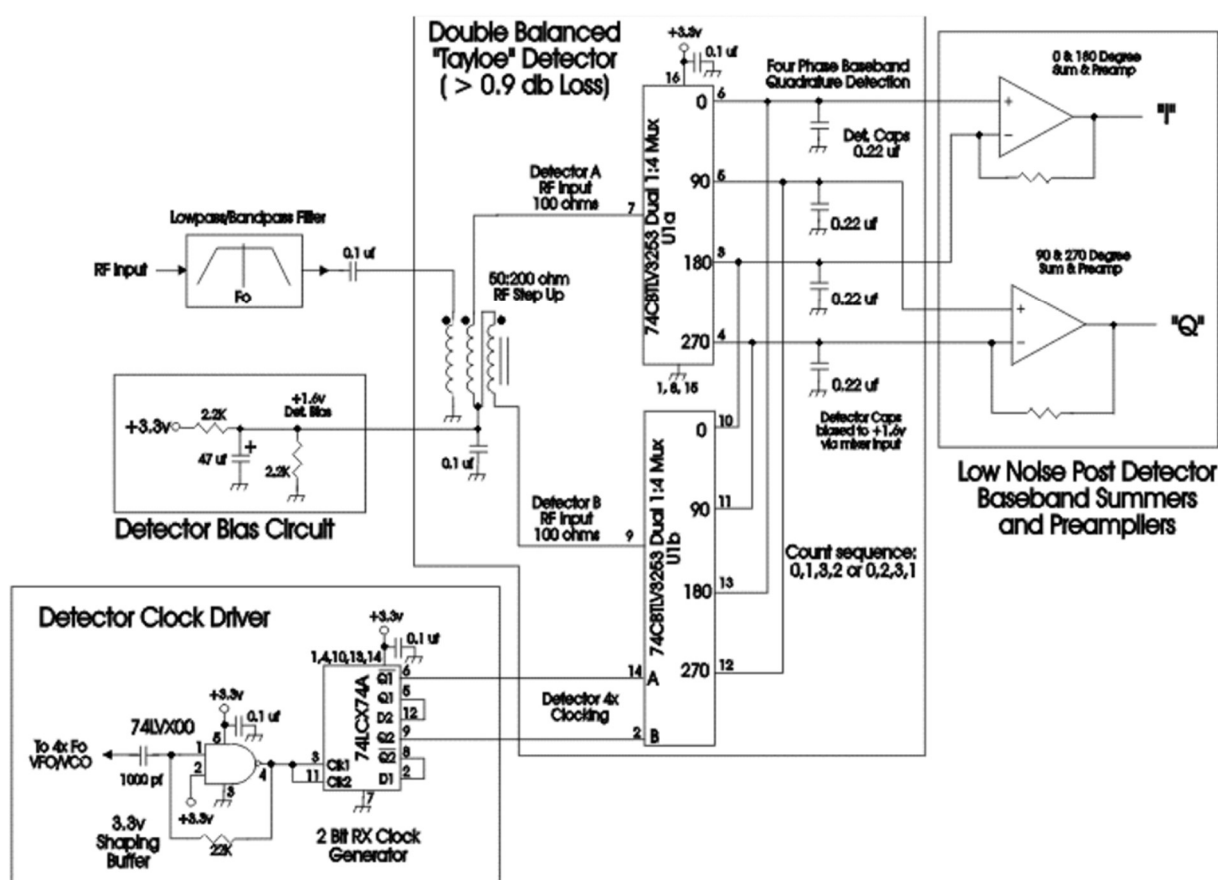
Эта версия пошла на шаг дальше и исключила входные резисторы в операционных усилителях предусилителя. Входные резисторы заменены системным сопротивлением, как видно на стороне конденсатора детектора. Для системы 50 Ом это номинально 200 Ом. Одним из результатов устранения входных резисторов является то, что усиление предусилителей удвоилось, поэтому резисторы обратной связи были уменьшены для компенсации.

Эта конфигурация близка к идеальной, но резисторы, используемые для смещения не инвертирующих входов, будут появляться параллельно с 200 Ом эффективного системного сопротивления стороны конденсатора детектора как источник шума 200 Ом. Шум даже от 200 Ом сопротивления является значительным для случаев с очень низким уровнем шума.



Это окончательная версия комбинации детектора/предусилителя. Обратите внимание, что предусилитель получает свое смещение от прямого соединения с детектором. Обратите внимание, что смещение детектора на входной стороне детектора появляется на каждом из четырех выходов конденсатора детектора.

Также возможна двойная сбалансированная версия детектора, как показано на следующем рисунке. Два отдельных детектора управляются входами, разнесенными на 180 градусов, с помощью входного трансформатора. Два детектора используют общий набор из четырех детекторных конденсаторов. Поскольку выходы двух детекторов сдвинуты на 180 градусов по фазе, детекторные конденсаторы теперь управляются по два за раз.



Анализ шума оптимальной конфигурации детектора/предусилителя

В оптимальной конфигурации на пути от антенны до входа операционного усилителя предусилителя нет резисторов. Шум резистора обратной связи обычно заглушается выходным шумом предусилителя, если он имеет достаточный коэффициент усиления.

Системный шум на входе RF выражается как:

$$-174 + 10\log(Bw) \text{ dbm or } 0.45 \text{ nV}/\sqrt{Bw}$$

где Bw — полоса пропускания приемника в Гц. На каждом из четырех входов предусилителей шум, рассматриваемый как системный шум, уменьшается на 0,9х (также 0,9db) потерь детектора.

Теперь предположим, что оба предусилителя имеют одинаковый коэффициент усиления, G, и встроенный шум, Np. На выходе каждого из предусилителей будет один шумовой член для предусилителя и два для шума системы, как видно по каждому из двух входов. Для одного выхода предусилителя этот шум будет:

$$\sqrt{(2 \cdot 0.9 \cdot 0.45)^2 + (Np)^2} \cdot G \cdot \sqrt{Bw}$$

Если выходы обоих предусилителей используются для создания одного составного сигнала, составной шумовой член будет:

$$\sqrt{(4 \cdot 0.9 \cdot 0.45)^2 + 2 \cdot (Np)^2} \cdot G \cdot \sqrt{Bw}$$

С другой стороны, выходной сигнал для входного сигнала S будет:

$$0.9 \cdot S^4 \cdot G$$

Оба уравнения сигнала и шума включают потерю детектора 0,9db.

Используя приведенные выше уравнения, реальная практика показывает, что чувствительность ограничивается потерями в 0,9db в процессе обнаружения и шумом первого предусилителя основной полосы частот.

Примеры расчетов шума

Между уравнением шума и уравнением сигнала можно найти уровень входного сигнала, необходимый для получения выходного

сигнала, равного выходному шуму:

$$0.9 \cdot S^4 \cdot G = G \cdot \sqrt{(4 \cdot 0.9 \cdot 0.45)^2 + 2 \cdot (Np)^2} \cdot \sqrt{Bw}$$

или

$$S = \sqrt{(4 \cdot 0.9 \cdot 0.45)^2 + 2 \cdot (Np)^2} \cdot \sqrt{Bw} / (0.9 \cdot 4)$$

Поучительно сравнить входной шум системы с уровнем сигнала, необходимым для достижения отношения S+N/N 3db.

Такая таблица показана ниже для приемника с полосой пропускания 1000Hz

System Noise @ Bw=1000Hz	Preamplifier Noise (nV/√Hz)	Signal level for 3 db S+N/N
14.2 nV / -143.8 dbm	9	113 nV / -125.8 dbm
14.2 nV / -143.8 dbm	4	55.3 nV / -132.0 dbm
14.2 nV / -143.8 dbm	2	34.8 nV / -136.0 dbm
14.2 nV / -143.8 dbm	1	27.3 nV / -138.1 dbm
14.2 nV / -143.8 dbm	0.8	17.3 nV / -142.1 dbm

Последняя запись демонстрирует важность очень малошумящего предусилителя основной полосы частот для общей чувствительности приемника. Чувствительность приемника теперь является функцией шума предусилителя операционного усилителя.

Современное состояние сверхмалошумящих операционных усилителей имеет уровни шума в диапазоне 0,8 нВ/кв. Гц. Это представлено такими устройствами, как Linear Technology LT1115. Обратите внимание, что когда детектор соединен с таким сверхмалошумящим устройством, как это, практически создать приемную систему, которая может принимать сигнал с 3 дБ S+N/N, что всего на 1,7 дБ выше шума системы без использования предусилителя RF.

Кроме того, тот факт, что этот предусилитель основной полосы частот устанавливается за полосовыми характеристиками детектора, делает его значительно менее восприимчивым к другим большим внутри полосным сигналам, чем типичная конструкция приемника, которая использует незащищенный усилитель RF перед широкополосным детектором.

Избирательный прием Image Reception

Если к обнаруженным сигналам применяется фазировка базовой полосы, чтобы обеспечить односторонний прием, например, Однополосный, детектор можно заставить инвертировать сторону обнаружения (верхняя боковая полоса против нижней боковой полосы), изменив направление вращения аналогового переключателя. 0 градусов становятся 270 градусами, 90 становятся 180, 180 становятся 90, а 270 становятся 0 градусами. Практически говоря, если двухбитный счетчик используется для выбора выходов переключателя, инвертирование этих битов изменит порядок переключения и, таким образом, обнаруженную боковую полосу.

Комментарии

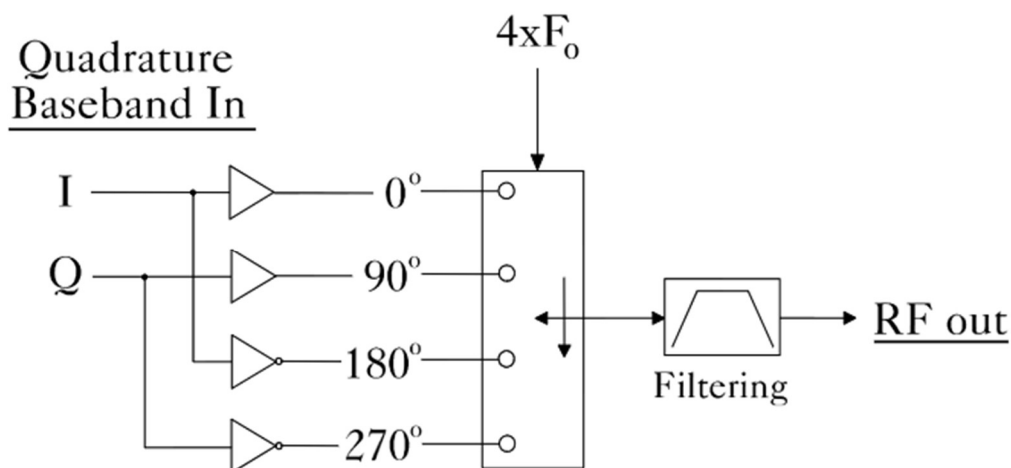
Этот детектор был построен и испытан. Двухдиапазонный 7 и 3,5 МГц 5 Вт прототип приемопередатчика был построен для личного любительского радиолюбительского хобби. Концепция хорошо сработала. Используя TI 74СВТ3253 (двойное 4:1 мультиплексное устройство переключения шины памяти) в качестве аналогового мультиплексора детектора 1-из-4, был получен перехват третьего порядка +30 дБм.

Несмотря на то, что прототип приемника имел 115 дБ усиления в основной полосе частот, никаких проблем с обратной связью не возникало. Это в первую очередь связано с тем, что выход детектора представляет собой довольно большой С относительно земли. Это приводит к тому, что эта наиболее чувствительная к обратной связи точка в схеме имеет относительно низкий импеданс, что снижает вероятность нежелательной обратной связи. Благодаря селективности отслеживания свободной полосы пропускания ($Q=3500+$), потерям преобразования РЧ в основную полосу 0,9 дБ и высокому динамическому диапазону детектора (+30 дБм, точка пересечения третьего порядка) можно построить высокопроизводительный приемник с очень низким уровнем шума без использования малошумящего предусилителя РЧ или полосового фильтра, при этом используя меньше деталей и снижая стоимость.

Квадратурный повышающий преобразователь

Основная операция

Квадратурный повышающий преобразователь по сути является квадратурным детектором продукта Таулоэ, запущенным в обратном направлении. См. рисунок № 5. В его простейшей форме не требуются ни конденсаторы детектора, ни резистор. Квадратурные входы основной полосы частот (0, 90, 180 и 270 градусов) включаются на четверть цикла каждый последовательно на желаемой частоте РЧ, как и детектор. Результирующий сигнал РЧ нуждается только в некоторой фильтрации (фильтр нижних частот или полосовой), чтобы объединить квадратурные части вместе на новой частоте.



За исключением потерь на коммутаторе и фильтре, сам процесс преобразования с повышением частоты, по сути, не имеет потерь. Потери в коммутаторе и фильтре можно свести к минимуму.

Квадратурный повышающий преобразователь требует в качестве входных данных все четыре фазы основной полосы частот. Однако высокоскоростные инвертирующие операционные усилители или простые дифференциальные драйверы позволяют легко создавать сигналы 180 и 270 градусов из обычных сигналов «I» 0 градусов и «Q» 90 градусов, как показано выше на рисунке № 5.

С тех пор я обнаружил, что этот повышающий преобразователь не является новым и использовался с другими четырехфазными 90-градусными сетями для получения сигналов SSB. Такие устройства, как 74CBT3253, должны позволять генерировать до 100 мВт SSB RF-энергии непосредственно из сдвинутых по фазе аудиовыходов, без усиления RF.

Комментарии

Также был построен и протестирован квадратурный повышающий преобразователь. Для проверки этой идеи был построен «своего рода супергетеродин».

Детектор продукта Таулоэ использовался для преобразования радиочастотного сигнала в четырехфазный квадратурный сигнал основной полосы частот, чтобы обеспечить источник сигнала для квадратурного повышающего преобразователя. Эти сигналы основной полосы частот пропускались через квадратурный повышающий преобразователь на частоту ПЧ, где преобразованный сигнал фильтровался, усиливался, возвращался обратно в аудио и усиливался до уровня динамика. И снова концепция была доказана.

Низкие потери в 1 дБ квадратурного детектора продукта Таулоэ в сочетании с почти без потерь процессом преобразования с повышением частоты квадратурного повышающего преобразователя

позволили создать сверх низко шумящий, супергетеродинный приемник без обычных изображений ПЧ или помех смесителя.

Несмотря на тестирование квадратурного повышающего преобразователя в условиях приемника, повышающий преобразователь идеально подходит в качестве передатчика дополнительного компонента для детектора квадратурного продукта приемника. Может быть желательно оставить конденсаторы на входах квадратурного повышающего преобразователя для целей преобразования более высокой мощности передатчика. Требования к переключению будут извлекать чрезвычайно короткие по длительности, четверть цикловые «всплески» сигнала для передачи из основной полосы на сторону ВЧ переключателя. Конденсатор поможет хранить энергию для этих всплесков, позволяя драйверам основной полосы обеспечивать более усредненную выходную мощность сигнала высокого уровня.

Точно так же, как и детектор продукта, если входы повышающего преобразователя работают в обратном направлении, частотный смысл выходов будет изменен на противоположный. Это может быть использовано для выборочной генерации либо сигналов верхней боковой полосы, либо сигналов нижней боковой полосы из одного квадратурного сигнала основной полосы. Аналогично, в приложениях приемника, как описано выше, фильтр ПЧ можно переключить с обнаружения верхней боковой полосы на нижнюю боковую полосу, просто изменив направление вращения либо в квадратурном повышающем преобразователе, либо в детекторе квадратурного продукта.

Если у кого-то возникнут дополнительные вопросы, со мной можно связаться по электронной почте mailto:Dan_Tayloe-P26412@email.mot.com