

# Как упростить проектирование многокаскадных радиосистем

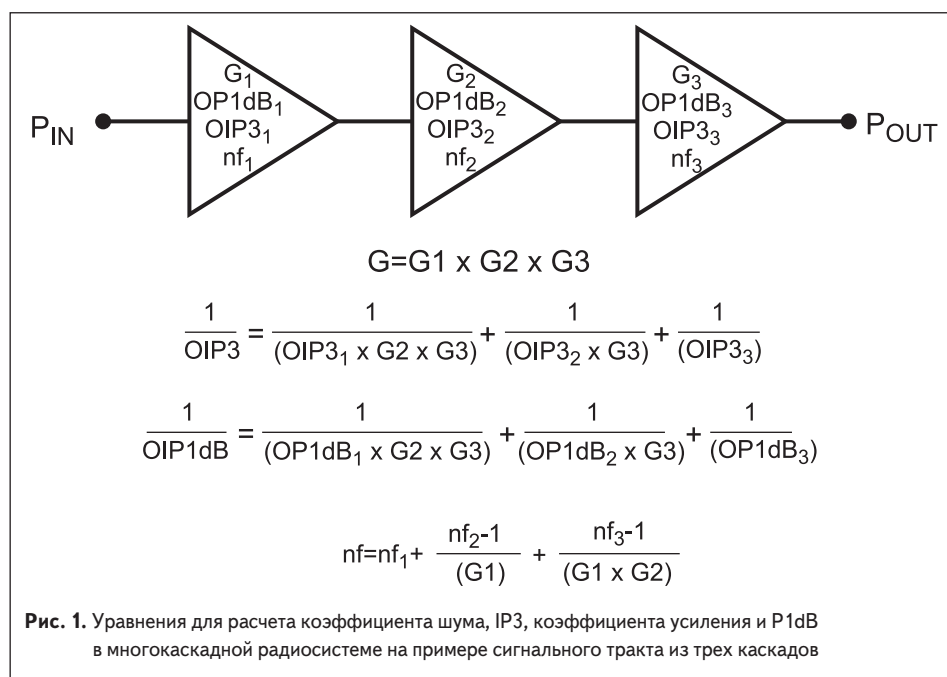
Имон Нэш (Eamon Nash)

Любой проект сигнального тракта радиосистемы начинается с выбора архитектуры. Определившись с наиболее подходящей архитектурой (например, супергетеродинная, с нулевой ПЧ, с дискретизацией на ПЧ и т. д.), разработчик системы должен выбрать компоненты, которые будут в ней использованы. На этом этапе очень важно, чтобы характеристики отдельных компонентов можно было легко сравнить друг с другом. При этом задача отнюдь не столь тривиальна и не сводится к простому выбору компонентов, обладающих некоторым минимально необходимым уровнем характеристик. Влияние, которое оказывают шум и искажения отдельного компонента на показатели всего сигнального тракта, сильно зависит от коэффициента усиления и местоположения компонента в сигнальном тракте. Так, например, уровень шума малошумящего усилителя, исполь-

зуемого в первом каскаде, в значительной степени определяет общий коэффициент шума, в то время как шум усилителя промежуточной частоты оказывает на него меньшее влияние.

Для оценки вклада отдельных компонентов в общие показатели сигнального тракта разработчики используют четыре классических уравнения, которые приведены на рис. 1 для примера сигнального тракта, состоящего из трех каскадов.

Суммарный коэффициент усиления определяется либо путем простого перемножения коэффициентов усиления отдельных каскадов, выраженных в раз, либо путем сложения коэффициентов усиления отдельных каскадов, выраженных в логарифмических единицах (дБ). В свою очередь, для нахождения точки пересечения с характеристикой интермодуляционных искажений третьего порядка (IP3), точки компрессии по уровню 1 дБ (P1dB)



и коэффициента шума каскадного соединения компонентов необходимо производить операции над величинами в линейном масштабе, предварительно преобразовав P1dB и IP3 в ватты (из дБм) и коэффициент шума в шум-фактор (коэффициент шума =  $10 \log(\text{шум-фактор})$ ).

Для выполнения этих вычислений системные инженеры традиционно используют электронные таблицы собственной разработки или средства компьютерного моделирования радиосистем. Существенным ограничением этих выражений является то, что они предполагают идеальное согласование импедансов отдельных элементов сигнального тракта. В реальных системах рассогласование импедансов в межкаскадных соединениях — распространенное явление, а в некоторых случаях его даже могут вносить намеренно.

На рис. 2 приведен фрагмент экрана с окном бесплатного инструмента для расчета параметров сигнального тракта радиосистем ADIsimRF, который разработан компанией Analog Devices. Основной функцией, которую он выполняет, является определение значений коэффициента усиления, коэффициента шума, IP3 и P1dB каскадного соединения компонентов в соответствии с выражениями, которые даны на рис. 1, а также потребляемой мощности. Количество каскадов анализируемой системы может изменяться динамически в пределах до 15. Дополнительные каскады можно добавлять в любой точке сигнального тракта. Отдельные каскады можно удалять из тракта или временно отключать.

ADIsimRF содержит встроенную базу данных дискретных ВЧ-компонентов производства компании Analog Devices. Эта база данных, которая также включает в себя модели пассивных компонентов, например симметрирующих трансформаторов и фильтров на ПАВ, доступна пользователю через выпадающие меню, как показано на рис. 2. Параметры компонентов (IP3, P1dB, коэффициент усиления и коэффициент шума) записаны в базе

данных с различным шагом по частоте. При выборе конкретного значения рабочей частоты из базы данных извлекаются параметры, соответствующие той частоте, которая ближе всего к выбранной пользователем. Данные из внутренней базы можно изменить вручную на передней панели инструмента, что упрощает создание и сохранение собственных моделей устройств.

Планирование распределения сигнальных уровней между отдельными каскадами может представлять сложность для компонентов, которые не являются простыми двухпортовыми устройствами с 50-омным входным и выходным импедансами. Так, например, квадратурный модулятор имеет три входа: I, Q и LO (гетеродин). В связи с этим возникает вопрос: как определить его коэффициент усиления? Кроме того, входы I и Q обычно имеют высокое входное сопротивление, что подразумевает очень высокий коэффициент усиления по мощности.

Входной сигнал для квадратурного модулятора, как правило, формируется при помощи двухканального ЦАП и пропускается через фильтр Найквиста. Этот фильтр нагружается на два шунтирующих резистора, подключенных к входам I и Q модулятора. Номинал резисторов обычно выбирают в диапазоне от 100 до 1000 Ом, и он определяет полный размах напряжения. Чтобы задать эффективный коэффициент усиления по мощности для квадратурного модулятора, в пакете ADIsimRF эти резисторы рассматриваются как составная часть квадратурного модулятора, что позволяет получить более разумные значения коэффициента усиления по мощности. В данном случае он определяется как разница между мощностью сигнала, поступающего в шунтирующие резисторы, и мощностью выходного сигнала ВЧ.

Для некоторых квадратурных модуляторов в базе данных ADIsimRF имеется несколько моделей с разными входными сопротивлениями.

При выходном сопротивлении 50 Ом и сопротивлении входного согласующего резистора в диапазоне от 100 до 1000 Ом коэффициенты усиления квадратурного модулятора по мощности и напряжению будут отличаться.

Ситуация с определением коэффициента шума квадратурного модулятора также не столь проста. Если мы воспользуемся описанной выше методикой определения коэффициента усиления квадратурного модулятора по мощности, то коэффициент шума может быть вычислен как разница между тепловым шумом ( $-173,8$  дБм/Гц) и выходным шумом квадратурного модулятора минус коэффициент усиления по мощности. Таким образом, при шумовом пороге  $-158$  дБм/Гц и коэффициенте усиления по мощности 3 дБ коэффициент шума квадратурного модулятора равен 13 дБ.

Моделирование компонентов со смешанными сигналами, например аналого-цифровых или цифро-аналоговых преобразователей, в типичном инструменте расчета параметров сигнального тракта ВЧ еще более затруднено. Это связано с тем, что ЦАП не имеет «коэффициента усиления» в явном виде, а его уровень шума и искажения изменяются в зависимости от частоты обновления, коэффициента интерполяции данных и уровня сигнала в дБ к полной шкале (dBFS).

В инструменте ADIsimRF «коэффициент усиления» ЦАП считается равным 0 дБ при уровне входного сигнала 0 dBFS и выходном квадратурном сигнале, центрированном относительно 0 Гц. При выборе меньшего уровня входного сигнала (например,  $-6$  dBFS) коэффициент усиления уменьшается на соответствующее количество дБ. Кроме того, с увеличением частоты выходного сигнала ЦАП коэффициент усиления также уменьшается для учета частотной характеристики преобразователя, которая имеет вид  $\sin(x)/x$ .

Чтобы учесть разнообразные конфигурации ЦАП, в базе данных ADIsimRF содержится несколько «версий» моделей для каждого ЦАП (например, AD9122V1, AD9122V2 и т. п.). Каждая версия соответствует различным рабочим конфигурациям, которые отличаются разным уровнем входного сигнала, частотой дискретизации и коэффициентом интерполяции.

Двухканальные дифференциальные бистродействующие ЦАП, которые используются для формирования входных сигналов квадратурных модуляторов, обычно работают с четырьмя подключенными к «земле» согласующими резисторами номиналом 50 Ом. Выходной ток ЦАП протекает через эти резисторы и входное шунтирующее сопротивление на входах квадратурного модулятора. В ADIsimRF уровень мощности выходного сигнала ЦАП принимается равным мощности, поступающей в шунтирующие резисторы на входе квадратурного модулятора.

На рис. 3 изображен фрагмент экрана с планом распределения сигнальных уровней для приемника диапазона 2,5 ГГц с дискретизацией на ПЧ. В этом приемнике входной сигнал подвергается усилению и переносится

**Рис. 2.** Применение ADIsimRF для распределения коэффициентов усиления между каскадами в дискретном передатчике с нулевой ПЧ

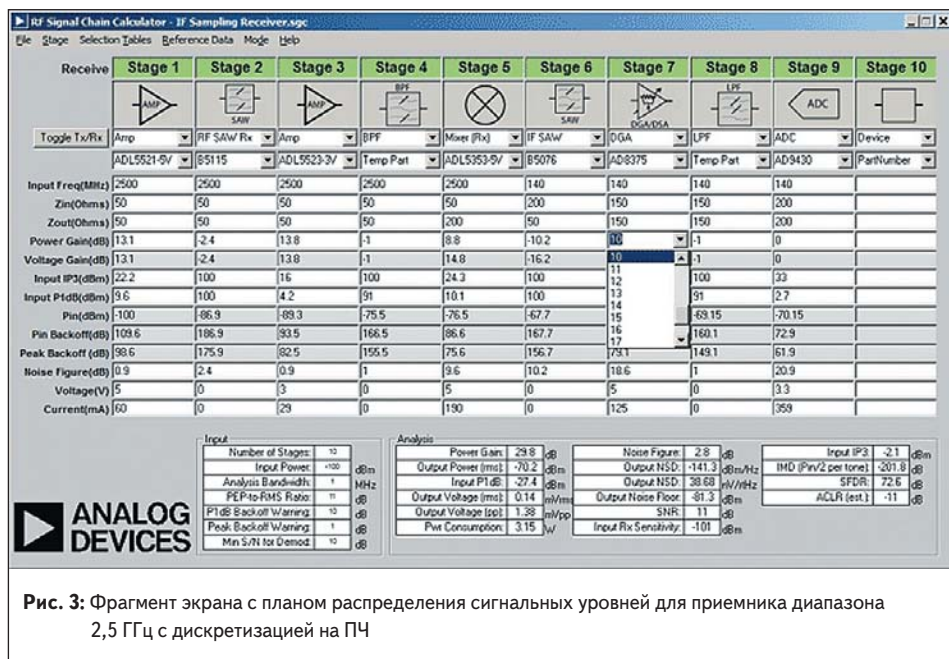


Рис. 3: Фрагмент экрана с планом распределения сигнальных уровней для приемника диапазона 2,5 ГГц с дискретизацией на ПЧ

при помощи смесителя на частоту 140 МГц, а затем оцифровывается при помощи АЦП. Каскад ПЧ включает в себя усилитель-драйвер АЦП AD8375, коэффициент усиления которого можно изменять в диапазоне от  $-4$  до  $+20$  дБ с шагом 1 дБ. Для выбора любого из 25 доступных коэффициентов усиления можно использовать выпадающее меню, как показано на рис. 3.

Как и в случае с ЦАП, создание модели АЦП для инструмента расчета параметров сигнального тракта ВЧ является нетривиальной задачей. Одна из типовых проблем заключается в том, что входной импеданс АЦП не всегда согласован с выходным импедансом соответствующего усилителя-драйвера. У АЦП AD9430 внутреннее входное сопротивление равно 3 кОм, и оно понижается до 200 Ом при

помощи внешнего шунтирующего резистора, который подключается между дифференциальными входами компонента (модель этого АЦП, хранящаяся в базе данных ADIsimRF, имеет входной импеданс 200 Ом). Однако даже в данном случае останется небольшое рассогласование между входным импедансом АЦП и выходным сопротивлением усилителя-драйвера АЦП и фильтра, используемого для предотвращения спектральных наложений. Инструмент ADIsimRF учитывает это рассогласование и соответствующим образом корректирует результаты расчета характеристик каскадного соединения компонентов.

ADsimRF — это простой в применении инструмент для распределения коэффициентов усиления между каскадами, который способен заменить самостоятельно разрабатываемые электронные таблицы. Помимо коэффициента усиления, IP3, P1dB и коэффициента шума он также позволяет рассчитывать потребляемую мощность и иные параметры, такие как среднеквадратическое значение и полный размах выходного напряжения. Задача включения АЦП и ЦАП в расчеты упрощается благодаря тому, что этот инструмент содержит модели соответствующих компонентов с необходимыми параметрами и поддерживает вычисление потерь, вызванных рассогласованием импедансов отдельных каскадов.

Инструмент ADIsimRF работает в операционных системах Windows XP, Windows Vista и Windows 7. Он доступен для загрузки бесплатно по адресу [www.analog.com/adisimrf](http://www.analog.com/adisimrf).