

# Технология совместного проектирования ЦОС и ВЧ-схем

Мурти Анмака, Keysight Technologies Inc.

В статье описывается новаторская технология проектирования электронных систем – технология совместного проектирования. Рассказывается о её достоинствах и ограничениях.

Взросший уровень информатизации во всех сферах деятельности создал большой потенциал для оптимизации процессов компаний. Это справедливо и в сфере проектирования электронных систем. В больших проектных организациях отделы, занятые проектированием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и схем, работающих с высокочастотными (ВЧ) сигналами, традиционно были разделены. Причём каждый отдел использовал различные методы и инструменты. Однако сегодня многие функции ВЧ-схем реализуются алгоритмически и крайне важно правильно организовать взаимодействие подразделений разработчиков.

Решением этой проблемы может стать совместное проектирование, в ходе которого все стороны активно участвуют в едином процессе разработки. И хотя организации могут иметь успешный опыт разработки электронных систем, таких как системы радиосвязи, смартфоны и системы космической связи, созданных без совместного проектирования, внедрение последнего позволит не только снизить риски и затраты, но и ускорит продвижение продукта на рынок. Последнее – первоочередная цель, к которой стремятся все современные проектные организации. Поэтому не удивительно, что технология совместного проектирования алгоритмов обработки модулирующего сигнала и распределённых ВЧ-цепей возникла как важный и востребованный элемент процесса разработки электронных систем.

## Преимущества и недостатки совместного проектирования

Несомненно, совместное проектирование предоставляет разработчикам целый ряд важных преимуществ. Например, в ходе совместного проектирования ЦОС и ВЧ-схем можно избежать лишних операций, неточных прогнозов и проблем сборки. С дру-

гой стороны, организации, применяющие совершенно иные процессы разработки, не использующие или почти не использующие взаимодействие подразделений и совместную проверку на разных этапах проектирования, могут столкнуться с дополнительными затратами и сложностями. Специалисты по алгоритмам сталкиваются с необходимостью учёта искажений ВЧ-сигнала в процессе цифровой обработки, а инженеры, работающие с ВЧ-цепями, не могут чётко представить, как работает их схема в общей инфраструктуре.

Совместная проверка в ходе проектирования позволяет решить некоторые из этих проблем и найти самые экономичные способы их решения. Иногда дешевле решить проблему за счёт применения более эффективного алгоритма обработки. В другом случае может оказаться, что дешевле купить более качественный ВЧ-усилитель. Понимание того, как лучше решить проблему и как проверить решение до окончательной сборки изделия, и является основным преимуществом совместного проектирования. Также оно позволяет минимизировать трудоёмкость и улучшить характеристики системы в рамках заданного бюджета.

Но, несмотря на эти преимущества, совместное проектирование ЦОС и ВЧ-схем не лишено недостатков. ЦОС и ВЧ-цепи моделируются по-разному. Моделирование ЦОС выполняется обычно в цифровой или временной области, а моделирование ВЧ-цепей – в частотной. Преобразование между этими двумя областями занимает много времени, но даже после переноса ВЧ-моделей во временную область многие элементы остаются в частотной области. Вы либо получаете детальную ВЧ-модель, которой полностью доверяете, но вынуждены использовать упрощённые сигналы, либо проверяете схему, состоящую из упрощённых ВЧ-моделей на сигналах со сложной огибающей. Совмест-

ное моделирование позволяет решить эту проблему за счёт одновременного взгляда с разных сторон.

И хотя совместное проектирование ЦОС и ВЧ-схем применяется уже достаточно широко, оно особенно эффективно для проектирования фазированных антенных решёток с адаптивным формированием луча, когда качество луча должно контролироваться в контексте системы. Кроме того, совместное проектирование можно применять для линеаризации усилителей и отслеживания огибающей, когда параметры усилителя должны меняться во времени. Также совместное проектирование пригодится в сквозных широкополосных системах связи.

## Совместное проектирование в действии

Чтобы лучше понять концепцию совместного проектирования, рассмотрим проектирование ВЧ-приёмника с достаточно высокими параметрами, не влияющими на эффективность алгоритмов. Например, приёмника РЛС с синтезированной апертурой (SAR) самолёта, которая охватывает некоторую область на земле. В ходе полёта луч антенны осматривает зону путём свипирования. РЛС непрерывно передаёт импульсы ЛЧМ (линейно-частотная модуляция) и регистрирует отражённые импульсы. Даже если земля неразличима с самолёта из-за облаков или тумана, она видна на экране РЛС, поскольку СВЧ-излучение легко проникает через подобные препятствия. По отражённым импульсам строится изображение. Это возможно за счёт применения специальных алгоритмов обработки сигнала. Так как частота отражённого сигнала лежит в СВЧ-диапазоне, перед обработкой его надо преобразовать в низкочастотный диапазон. Эту работу и должен выполнять ВЧ-приёмник. При этом качество сигнала не должно значительно ухудшаться.

Изображение цели создаётся в формате JPG или GIF. Интенсивность отражённого сигнала пропорциональна яркости изображения. Такое представление близко к реальности, в то же время работает достаточно быстро.

В процессе оценки качества полученного изображения учитываются параметры ВЧ-усилителя, ВЧ-смесителя, гетеродина понижающего преобразователя, нелинейность усилителя, фазовый шум гетеродина и параметры смесителя. В данном случае (см. рис. 1) фазовый шум гетеродина приводит к незначительному снижению контрастности в ВЧ-приёмнике. И хотя на глаз это влияние почти незаметно, приборы его регистрируют. На рисунке 1 шум нарастает слева направо (на правом изображении усилитель близок к точке компрессии).

С другой стороны, когда усилитель входит в область компрессии на 1 дБ, это весьма заметно сказывается на изображении. По мере приближения к точке компрессии начинают исчезать мелкие детали и теряется чувствительность.

Потеря детализации обусловлена и другими причинами. Рассмотрим аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Когда его разрядность снижается с 14 до 12 и потом до 10 разрядов, начинается расслоение изображения и наблюдается потеря детализации (см. рис. 2). При достижении 6 разрядов детализация ухудшается значительно. При таком снижении лучше добавить во входные цепи автоматическую регулировку усиления (АРУ). Кроме того, для попадания в оптимальный диапазон разрядности АЦП можно выполнить автомасштабирование.

Если перечисленное усугубляется низким уровнем дискретизации, фазовым шумом и насыщением, то результат становится и вовсе бесполезным. Кроме низкого разрешения АЦП в данном примере присутствует ещё и джиттер тактовой частоты, который ограничивает пространственное разрешение РЛС.

Для отделения полезного сигнала от помех используется обработка демо-

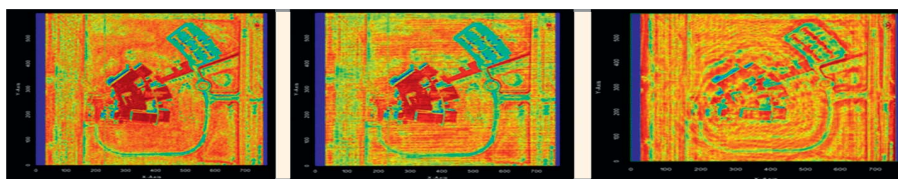


Рис. 1. Влияние фазового шума генератора на изображение

дулированного сигнала. Но если тракты передачи и приёма спроектированы не оптимально, при дальнейшей обработке компенсировать это алгоритмами не получится. Чтобы схемотехника и алгоритмы успешно работали вместе, оба компонента системы должны быть качественными.

В процессе совместного моделирования ЦОС и ВЧ-цепей выяснилось, что насыщение усилителя имеет несколько большее влияние по сравнению с разрядностью АЦП. Дальнейшие исследования показали, что в процессе совместного моделирования можно отладить алгоритмы последующей обработки и определить оптимальный размер быстрого преобразования Фурье (БПФ), необходимый для обработки сжатых импульсов.

Совместное моделирование может использоваться для ускорения моделирования и повышения его точности. В качестве примера рассмотрим совместное моделирование реальной, применяемой в SAR, ВЧ-схемы, выполненное с помощью САПР системного уровня Keysight SystemVue и САПР Advanced Design System (ADS). Программный и системный симуляторы были совместно использованы для построения изображения, создаваемого SAR (см. рис. 3). Применение реальной ВЧ-схемы позволило ввести в систему модели полупроводниковых приборов и паразитных элементов платы. Преимущество этого подхода заключается

в том, что он позволяет учесть нелинейность усилителя, шум, рассогласование по входу и выходу, преобразования АМ-АМ и АМ-ФМ, а также эффекты памяти.

Такое совместное моделирование даёт высокую точность, но существенно увеличивает время разработки. Чтобы сократить это время, было выполнено системное моделирование с применением модели на основе X-параметров (зарегистрированный товарный знак компании Keysight Technologies) ВЧ-усилителя (см. рис. 3б). Модель на основе X-параметров сохраняет точность и детализацию моделирования, существенно сокращая при этом время – в данном случае более чем в 10 раз по сравнению с совместным моделированием на уровне цепей. Дальнейшего улучшения процесса совместного моделирования можно добиться за счёт применения расширенных методов, таких как метод огибающей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следуя предложенной методике, можно легко и точно выполнить совместное моделирование ЦОС и ВЧ-схем, причём время моделирования остаётся вполне приемлемым. Возможность совместной проверки системы в разных областях позволяет проектным организациям снизить риски на заключительных этапах проектирования и выполнять перекрёстные проверки по мере развития проекта. В конечном итоге это позволяет снизить затраты и ускорить выполнение работ по разработке.

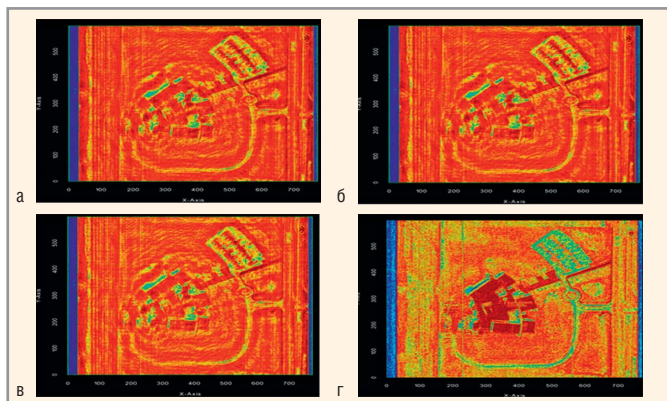


Рис. 2. Изменение качества изображения по мере снижения разрядности АЦП: а – 14 разрядов; б – 12 разрядов; в – 10 разрядов; г – 6 разрядов, дополнительно снижено насыщением усилителя

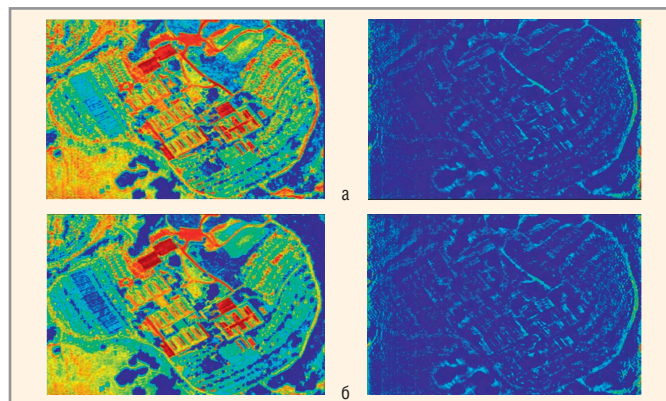


Рис. 3. Моделирование SAR: а – совместное моделирование реальных схем в САПР Keysight SystemVue и Advanced Design System; б – моделирование с помощью модели на основе X-параметров