

# Проблемы заземления и трассировки плат с АЦП и схем со смешанными сигналами

## для обеспечения динамических параметров при одновременной минимизации радиочастотных и электромагнитных помех

Многим разработчикам долгое время не удавалось достичь желаемых характеристик схем с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), и они приходили к выводу, что получение приводимых в технической документации характеристик вообще невозможно на практике. Виною тому неудачная техника заземления в схемах с быстродействующими АЦП и схемах со смешанными сигналами, которая приводит к чрезмерным помехам, если токи сигналов цифровых цепей находят себе пути в аналоговой области схемы (через общие цепи заземления).

Николас Грэй

info@rainbow.msk.ru

Существует много способов организации заземления в схемах с АЦП и в схемах со смешанными сигналами, и каждый разработчик на этот счет имеет свое мнение. Выбор того или иного метода заземления обычно опирается на положительный опыт. У популярной техники заземления схем с АЦП, основанной на разделении цепей заземления, которая дает превосходные первичные шумовые характеристики, есть свои недостатки. Она подходит для получения хороших шумовых характеристик от быстродействующих АЦП, однако не годится с точки зрения повышенного уровня электромагнитных и радиочастотных помех.

В этой статье мы обсудим, как осуществить заземление, чтобы добиться хорошего соотношения динамических характеристик и минимального уровня радиочастотных и электромагнитных шумов. Предметом нашего внимания станет поверхностный эффект (skin effect) и эффект наводки (proximity effect).

### Поверхностный эффект

Мы знаем, что электрический ток выбирает путь наименьшего импеданса. В этом случае постоянный и низкочастотный токи заполняют весь объем проводника. В случае с полигоном металлизации ток распространяется таким образом, чтобы заполнить весь его объем, и сопротивление этого полигона зависит от площади его поперечного сечения.

Однако как только частота сигнала достигает нескольких мегагерц, путем наименьшего импеданса становится путь наименьшей индуктивности. При протекании переменного тока через проводник переменное магнитное поле внутри и вокруг него сильнее у центра проводника и ослабевает пропорционально расстоянию от центра. В результате в центре проводника возникает более высокая индуктивность, уменьшающаяся с увеличением расстояния от центра. Она вынуждает переменный ток течь преимущественно у поверхности проводника или по его поверхности. Это явление известно как поверхностный эффект [4].

Суть его заключается в том, что для высоких частот эффективная площадь поперечного сечения проводника ниже, чем можно предположить, а реактивная составляющая импеданса проводника на самом деле больше, чем сопротивление, которое показал бы омметр. Реактивная составляющая сопротивления плоского проводника (такого как дорожка печатной платы) определяется формулой

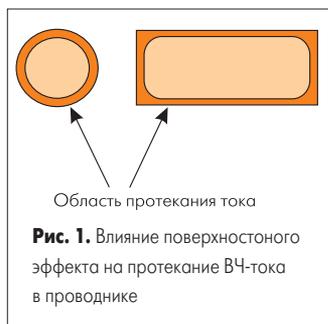
$$R_{AC} = \frac{2,61 \times 10^{-7} \sqrt{f} \times \rho_r}{2 \times (w + h)}$$

где  $R_{AC}$  — реактивное сопротивление (Ом/мм),  $f$  — частота (Гц),  $\rho_r$  — удельное сопротивление проводника ( $\rho_r$  меди = 1,00),  $w$  — ширина печатного проводника в миллиметрах,  $h$  — высота печатного проводника в миллиметрах.

Из этой формулы следует, что при частоте сигнала 40 МГц типовая дорожка печатной платы шириной 0,15 мм и высотой 0,04 мм имела бы реактивное сопротивление 0,043 Ом/см. Удвоение толщины (высоты) дорожки до 0,08 мм увеличит площадь поперечного сечения проводника в 2 раза, уменьшив его реактивное сопротивление всего на 17%. Если же удвоить ширину дорожки (до 0,3 мм), то удвоится и общая площадь проводника, и площадь его поперечного сечения. Реактивное сопротивление в этом случае уменьшится на 44%. Очевидно, что на высоких частотах общая площадь поверхности проводника важнее, чем площадь его поперечного сечения.

С ростом частоты поверхностный эффект становится более выраженным, при этом проводник может быть полым и тонкостенным (рис. 1).

Индуктивность дорожки или проводника вынуждает ток течь только по его поверхности, вследствие чего эффективная площадь сечения проводника радикально уменьшается, что, в свою очередь, приводит к росту сопротивления проводника с ростом частоты. Но это не единственный эффект, определяющий реактивное сопротивление проводника.



**Эффект близости**

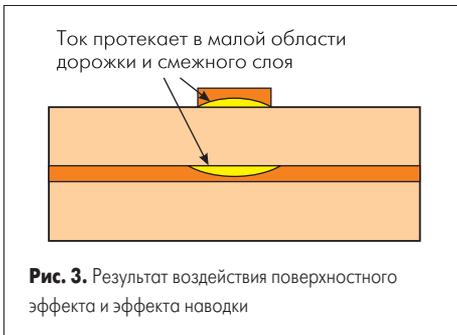
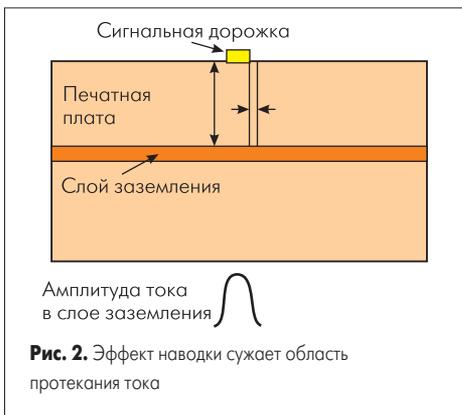
Магнитное поле, создаваемое вытекающими и втекающими токами, вынуждает их течь как можно ближе друг к другу, минимизируя область прохождения сигнала и количество энергии, необходимой для создания и поддержания магнитного поля. Это заставляет втекающий ток в смежном слое (смежный слой или полигон земли) течь в этом слое по пути, пролегающему как можно ближе к соответствующему вытекающему току. Результатом является протекание втекающего тока в узкой области проводника, находящейся под или над проводником, несущим соответствующий вытекающий ток.

Зависимость плотности тока в смежном слое от расстояния до проводника, несущего вытекающий ток, определяется следующим образом [5]:

$$I_{RP} = \frac{i}{H \times \pi \times (1 + (D/H)^2)}$$

где  $I_{RP}$  — плотность тока в смежном слое на горизонтальном удалении  $D$  от дорожки с вытекающим током,  $i$  — ток сигнала,  $H$  — высота сигнальной дорожки над смежным проводником,  $D$  — горизонтальное удаление от края дорожки.

График, построенный по этой формуле, показывает, что плотность тока в смежном слое быстро уменьшается с ростом расстояния от края сигнальной дорожки (рис. 2). Факт, что



втекающий ток в смежном слое имеет тенденцию течь очень близко к вытекающему току, известен как эффект наводки или близости (proximity effect) [5].

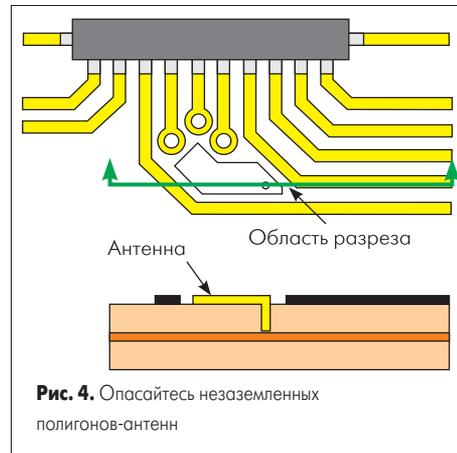
Кроме того, эффект наводки заставляет вытекающий ток течь главным образом на той стороне проводника, которая находится ближе всего к втекающему току, а обратный ток — на той стороне несущего его проводника, которая находится ближе к вытекающему току.

Объединяясь, поверхностный эффект и два типа эффекта наводки сужают токонесущую область проводника до очень малой, по сравнению с полной площадью сечения, части проводника (рис. 3). Так как ток течет лишь в этом малом участке проводника, реактивное сопротивление будет намного выше ожидаемого.

**Излучение**

Проводники, по которым протекает ток, становятся источниками излучения, уровень которого является функцией их длины и расстояния между ними. Иначе говоря, излучение проводников — функция площади петли прохождения тока. Не имеет значения, является ли один из проводников (или оба) частью провода, дорожки или полигона печатной платы. Излучение растет с увеличением площади петли. Область петли прохождения сигнала образует петлевую излучающую антенну.

Незаземленный или заземленный только в одной точке полигон на печатной плате может представлять собой антенну, которая будет излучать энергию. Рисунок 4 иллюстри-



рует такого рода антенну. В данном случае, чтобы избавиться от излучения, необходимо при помощи переходного отверстия соединить этот полигон с заземляющим слоем в противоположной его части или избавиться от полигона вообще.

Приведенные выше рекомендации специалистов компании National Semiconductor в сочетании с уже известными концепциями и требованиями к заземлению и трассировке плат лежат в основе эффективной разработки устройств и позволяют достичь требуемых параметров при минимальном уровне электромагнитных и радиочастотных помех.

**Литература**

1. Gray Nicholas. The problem of ADC and mixed-signal grounding and layout for dynamic performance while minimizing RFI/EMI // National Edge Technical Journal, November 2004 edition.
2. Attack The Noise Gremlins That Plague High-Speed ADCs // Electronic Design. 1999. Dec. 17.
3. Maintaining Signal Integrity Enhances ADC Circuit Performance // Electronic Design. 2000. May 1.
4. Pay Attention To The Clock And Output Bus To Improve High-Speed ADC Designs // Electronic Design. 2000. Jun. 26.
5. High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic. Howard Johnson & Martin Graham Prentis Hall. 1993.