

УПРАВЛЕНИЕ ТАКТОВЫМ СИГНАЛОМ ПРИ ПОДАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

САССАН ТАБАТАБАИ (SASSAN TABATABAEI), директор по стратегическим приложениям, SiTime Corporation

Проблема снижения электромагнитных помех (ЭМП) становится все более актуальной в связи с необходимостью повышения надежности работы быстродействующих устройств. В статье рассмотрены основные источники ЭМП и способы их подавления в системе. Основное внимание уделено таким методам как фильтрация, управление временем нарастания/спада тактового сигнала, а также формированию тактового сигнала с распределенным спектром. Статья представляет собой перевод [1].

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых источников ЭМП является сеть тактовых сигналов. При проектировании сети тактовых сигналов необходимо особое внимание уделить следующим блокам системы:

- источнику тактового сигнала и линиям проводников, связанных с ним;
- схемам, которые управляются тактовыми сигналами. Эти схемы могут состоять из дискретных устройств, но чаще они содержат небольшое число крупных интегральных схем (ИС), которые выполняют ключевые функции для данного приложения;
- схемам ввода/вывода и линиям проводников, которые обеспечивают обмен данными между микросхемами или между микросхемой и внешними системами.

Основной причиной электромагнитного излучения является отсутствие канала возврата сигнала в линии передачи. Это обычно происходит, когда имеются разрывы в слое земли или шине возврата сигнала, находящихся в печатной плате (ПП) ниже проводников с тактовыми и другими сигналами. Энергия ЭМП, как правило, концентрируется на тактовой частоте и ее гармониках. Энергия на высших гармониках зависит от формы тактового сигнала. Поскольку большинство тактовых сигналов имеют почти прямоугольную форму с конечной скоростью нарастания фронта, гармоники сигнала играют важную роль в ЭМП. В общем случае более высокая скорость нарастания сигнала и наличие выбросов сигнала из-за несовершенного согласования нагрузки приводят к росту ЭМП на частотах гармоник.

Основными методами подавления ЭМП являются:

- экранирование;
- использование непрерывного слоя заземления или канала возврата сигнала для высокоскоростных сигналов;
- фильтрация сигналов;
- увеличение времени нарастания/спада сигнала;

– использование тактового сигнала с распределенным спектром.

Экранирование требует размещения системы в заземленном проводящем корпусе для блокировки излучения энергии во внешнее пространство. Для многих потребительских и компьютерных приложений такое решение является довольно дорогостоящим или непрактичным из-за ограничений на физические размеры системы. Использование непрерывного слоя заземления рекомендуется не только для снижения помех, но также для сохранения целостности сигнала в высокоскоростных каналах передачи. Однако небольшое количество энергии будет излучаться даже при наличии непрерывного заземления с верхней стороны проводника. Во многих случаях чтобы обеспечить непрерывное заземление или канал возврата для всех сигналов на высокоплотных ПП, могут потребоваться дополнительные слои земли, что увеличивает стоимость платы.

ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ПОМЕХ

Использование фильтров нижних частот для высокоскоростных тактовых сигналов эффективно ослабляет частотный спектр сигнала, особенно на гармониках высшего порядка. Для фильтрации обычно используют простой RC-фильтр нижних частот из-за его низкой стоимости и малой площади, занимаемой на плате. RC-фильтр — это однополюсный фильтр с 3-дБ ослаблением на частоте среза и 20-дБ/декада ослаблением для более высоких частот. Частота среза фильтра должна быть приблизительно в два раза выше тактовой частоты, чтобы избежать слишком сильного уменьшения размаха сигнала, что может привести к нарушению работы цифровых схем (изменению порога срабатывания). Такой фильтр подходит для подавления ЭМП на высших гармониках, например, он обеспечивает 20-дБ ослабление на 11-й гармонике тактового сигнала.

Метод фильтрации имеет следующие недостатки:

1. Разработчик ПП должен размесить фильтры на выходах сигналов с наивысшим уровнем ЭМП, но зачастую трудно определить эти сигналы. В схемах, где один источник тактового сигнала управляет одной или двумя основными ИС, размещение фильтра на тактовом сигнале может стать эффективным решением.

2. Фильтры нижних частот не обеспечивают сильного подавления ЭМП на основной тактовой частоте и первых двух или трех гармониках.

3. Фильтры представляют собой резистивную и емкостную нагрузку для выходных драйверов, что увеличивает потребляемую мощность.

4. RC-фильтры занимают дополнительную площадь на плате и увеличивают стоимость. Это особенно справедливо, когда фильтры должны использоваться отдельно для нескольких сигнальных линий.

ПОДАВЛЕНИЕ ЭМП С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ВРЕМЕНЕМ НАРАСТАНИЯ/СПАДА ТАКТОВОГО СИГНАЛА

Увеличение времени нарастания/спада несимметричных тактовых и других сигналов является эффективным путем снижения гармонических ЭМП. На рисунке 1 показана амплитуда гармоник тактового сигнала в зависимости от времени нарастания/спада (предполагается, что время нарастания и спада одинаково). Все значения времени нарастания выбраны так, чтобы обеспечить максимальную величину размаха тактового сигнала. Как видно из рисунка, уровень большинства гармоник может быть снижен на 20 дБ и более при максимальном размахе тактового сигнала. Фактически, увеличение времени нарастания/спада обеспечивает более эффективное подавление ЭМП, чем применение RC-фильтров, не уменьшая при этом размаха напряжения.

Большинство драйверов несимметричных сигналов, таких как LVCMOS, содержат двухтактные каскады. В таких схемах максимальный выходной ток драйвера и эффективная емкость нагрузки определяют время нарастания/спада тактового сигнала. Вследствие этого есть два способа увеличения времени нарастания/спада:

- увеличение емкости нагрузки. Недостаток этого метода — рост потребления тока;

- уменьшение выходного тока. Этот способ не увеличивает потребления тока, но требует, чтобы была обеспечена возможность программирования нагрузочной способности устройства формирования тактового сигнала. Некоторые устройства, например, программируемые генераторы, и выходные буферы в больших ИС допускают регулировку нагрузочной способности драйвера.

Основные недостатки этого метода подавления ЭМП:

- данный метод позволяет снизить уровень гармонических помех только тактового сигнала;

- невозможно в достаточной степени увеличить время нарастания/спада для высокоскоростных сигналов.

ПОДАВЛЕНИЕ ЭМП С ПОМОЩЬЮ ТАКТОВОГО СИГНАЛА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ СПЕКТРОМ

Методы формирования сигнала, такие как фильтрация и управление временем нарастания/спада, не эффективны для

снижения ЭМП, генерируемых на основной гармонике. Кроме того, эти методы не уменьшают помехи от чипсетов и проводников, которые управляются буферами без применения фильтров или регулировки времени нарастания/спада. Помимо линий с тактовым сигналом энергию излучают и линии сигналов данных. Эта энергия ослаблена за счет случайного характера сигналов данных, но все же может превышать допустимые уровни, т.к. обычно в системе имеется намного больше сигналов данных, чем тактовых сигналов.

Разработчики ПП используют управление скоростью нарастания выходного напряжения и тщательно проектируют топологию линий передачи с целью снижения уровня помех, но из-за большого числа источников уровень остаточных помех на основной частоте и его гармониках может быть высокими. В подобных случаях эффективным системным решением для подавления ЭМП является формирование тактовых сигналов с распределенным спектром.

Генерирование тактовых сигналов с распределенным спектром реализуется с помощью низкоскоростной частотной модуляции тактового сигнала. Модуляция распределяет энергию тактового сигнала по более широкой полосе частот, что снижает максимальную мощность излучения для данной полосы пропускания. Наиболее часто пиковый уровень ЭМП измеряют в полосе частот 100 кГц, как определено Федеральной комиссией по

связи (FCC). Для большинства приложений частота модуляции тактового сигнала с распределенным спектром равна 32 кГц, что обеспечивает достаточно пологую характеристику в области распределения спектра несущей частоты.

Чаще всего используют треугольный профиль модуляции, как показано на рисунке 2б. Такой профиль эффективно распределяет энергию несущей частоты равномерно в пределах диапазона модуляции и обеспечивает достаточно пологий спектр на тактовой частоте и его гармониках. Синусоидальная модуляция (см. рис. 2а) не обеспечивает такой плоской характеристики из-за менее равномерного распределения частоты. На рисунке 2в показан профиль модуляции Hershey-Kiss, который обеспечивает оптимально пологий спектр несущей частоты. Такой профиль обеспечивает на 1,5 дБ меньший уровень пиковых ЭМП, чем треугольная модуляция, но его труднее реализовать.

При условии, что тактовая частота модулируется с коэффициентом модуляции $SSC_{percentage}$ (выраженным в процентах), а гармонический спектр после его распределения достаточно плоский, максимальное подавление энергии можно оценить исходя из следующего уравнения:

$$A_{SSC}(i) \cdot \sqrt{f_{SSC_range}} = A_{clk}(i) \cdot \sqrt{RBW} \quad (1)$$

где $A_{SSC}(i)$ — амплитуда i -й гармоники тактового сигнала после модуляции распределением спектра, f_{SSC_range} — частотный диапазон, в пределах которого распределяются гармоники тактового сигнала, $A_{clk}(i)$ — амплитуда i -й гармоники тактового сигнала до распределения спектра и RBW — полоса частот измеряемой энергии ЭМП.

f_{SSC_range} определяется, исходя из выражения: $f_{SSC_range} = f_{clk}(i) \cdot SSC_{percentage}$, поэтому подавление ЭМП на i -й гармонике можно рассчитать так:

$$A_{SSC}(i)(дБ) = A_{clk}(i)(дБ) - 10 \log_{10} \cdot (SSC_{percentage} \cdot f_{clk}(i) / RBW)$$

Это уравнение показывает, что чем выше тактовая частота, тем больше подавление ЭМП.

Профиль распределения спектра тактового сигнала может быть отцентрирован по опорной частоте тактового сигнала или может иметь частоту, которая меньше этой опорной частоты. Первое распределение называют центральным распределением частоты (center-spread), а второе — распределением с понижением частоты (down-spread). Понижение частоты гарантирует, что при распределении спектра длительность периода тактового сигнала не может стать меньше

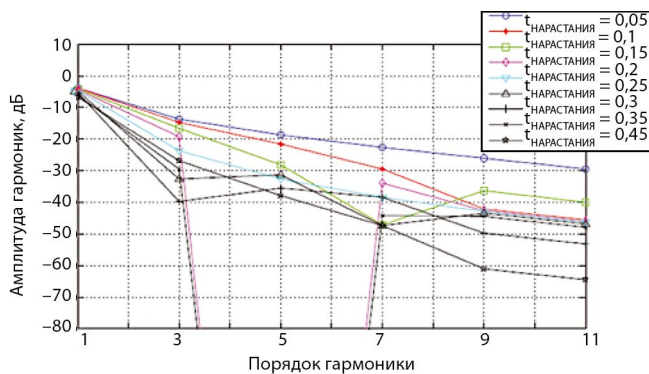


Рис. 1. Амплитуда гармоник тактового сигнала уменьшается при увеличении времени нарастания/спада. Время нарастания приведено к периоду тактового сигнала.

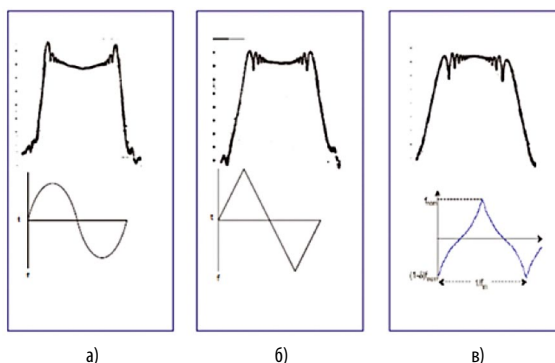


Рис. 2. Профили модуляции тактовых сигналов с распределенным спектром. а) синусоидальная модуляция. б) треугольная модуляция. в) модуляция Hershey-Kiss

длительности периода тактового сигнала без распределения спектра. Это особенно важно для процессорных приложений, где необходимо, чтобы изменение периода тактового сигнала не вызывало нарушений синхронизации конечных автоматов (машин состояний) процессоров. В распределении с понижением частоты, однако, средняя частота может меняться в широком диапазоне, например, до несколько сот ppm. Такое сильное изменение средней частоты может привести к переполнению буфера в некоторых системах ввода/вывода.

Центральное распределение частоты обеспечивает более точное задание средней частоты, но приводит к уменьшению длительности периода. При центральном распределении частоты пользователь должен убедиться, что процессор и конечные автоматы рассчитаны на работу при максимальной частоте тактового сигнала с учетом распределения спектра. Преимущество в данном случае состоит в более простом управлении буфером в системах ввода/вывода.

На рисунках 3 и 4 показано подавление ЭМП для основной гармоники 12- и

125-МГц тактового сигнала, соответственно. Диапазон модуляции составляет 2%, а профиль модуляции — треугольный для обоих случаев. Приведенные данные показывают, что чем выше тактовая частота, тем сильнее подавление ЭМП. Рисунки 5 и 6 иллюстрируют подавление помех для первой, третьей, пятой и седьмой гармоник 100-МГц тактового сигнала с треугольным 2%-распределением с понижением частоты. Из рисунков видно, что ЭМП на высших гармониках подавляются в большей степени, чем на низших гармониках.

Распределение спектра тактовых сигналов широко используется в ряде приложений, например, в принтерах и микроконтроллерных системах, т.к. оно обеспечивает следующие преимущества:

1. Снижение стоимости. Во-первых, не нужны дорогие способы экранирования. Во-вторых, уменьшается число слоев земли в ПП. Не всегда можно обеспечить сплошной слой земли под проводниками тактовых сигналов и сигналов данных, что приводит к возможности излучения ЭМП. Одним из решений может быть введение дополнительных слоев земли, но

это повышает стоимость платы. Метод распределения спектра тактового сигнала помогает снизить ЭМП и сэкономить дополнительные слои земли.

2. Гибкость. Систему можно спроектировать изначально без распределения спектра тактового сигнала. Если результаты тестов на ЭМП указывают на наличие определенных проблем, то обычный генератор тактовых сигналов может быть заменен на генератор с распределением спектра, чтобы снизить уровень помех, не меняя что-либо еще в системе. Кроме того, коэффициент распределения можно отрегулировать точно в соответствии с заданным уровнем ЭМП для системы. Это позволит минимизировать влияние всех регуляторов на предельные допуски для системной синхронизации.

3. Подавление ЭМП в масштабах системы. Другие подходы к подавлению ЭМП, такие как фильтрация, формирование сигнала, обеспечение непрерывности земляной шины и экранирование снижают ЭМП в определенных узлах системы, т.е. там, где применяется данный метод. В отличие от этого распределение спектра тактового сигнала снижает помехи от всех сигналов, синхронных с тактовым, независимо от их местоположения.

Однако есть ситуации, когда распределение спектра тактового сигнала не позволяет легко решить проблему снижения ЭМП.

1. Распределение спектра увеличивает периодический джиттер. Например, в 100-МГц тактовом сигнале с 1%-модуляцией спектра максимальный периодический джиттер увеличивается на 1% от периода тактового сигнала или на 100 пс. Когда используется центральное распределение спектра, длительность периода уменьшается и иногда становится короче, чем без распределения спектра, что может нарушить синхронизацию критических каналов в цифровых схемах. Чтобы избежать этой проблемы, часто более предпочтительным способом является распределение с понижением частоты, т.к. в этом случае гарантируется, что период тактового сигнала не становится короче, чем без распределения спектра.

2. Требуется большая глубина и более сложное управление буферов. Многие системы используют два разных тактовых сигнала — один в источнике данных, например, в процессоре, а другой — в приемнике данных, например, в периферийном устройстве. Поскольку тактовые сигналы не синхронизированы, приемнику нужно буферизировать принимаемые данные, чтобы избежать их потерь. Кроме того, в приемнике нужно использовать определенный протокол управления, чтобы обеспечить возможность синхронизации с тактовым сигналом источника. Когда используется распределение спектра тактового сигнала, глубина буфера и протокол управления должны иметь

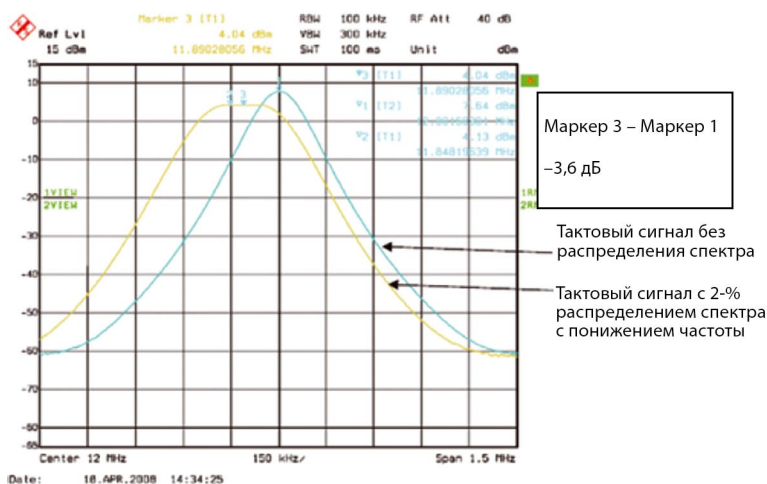


Рис. 3. Спектр основной гармоники для 12-МГц тактового сигнала с треугольным 2%-распределением спектра с понижением частоты и без распределения спектра

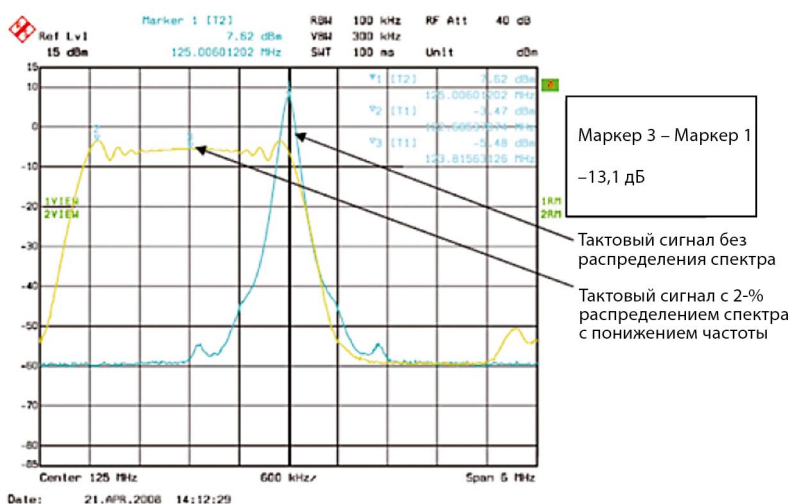


Рис. 4. Спектр основной гармоники для 125-МГц тактового сигнала с треугольным 2%-распределением спектра с понижением частоты и без распределения спектра

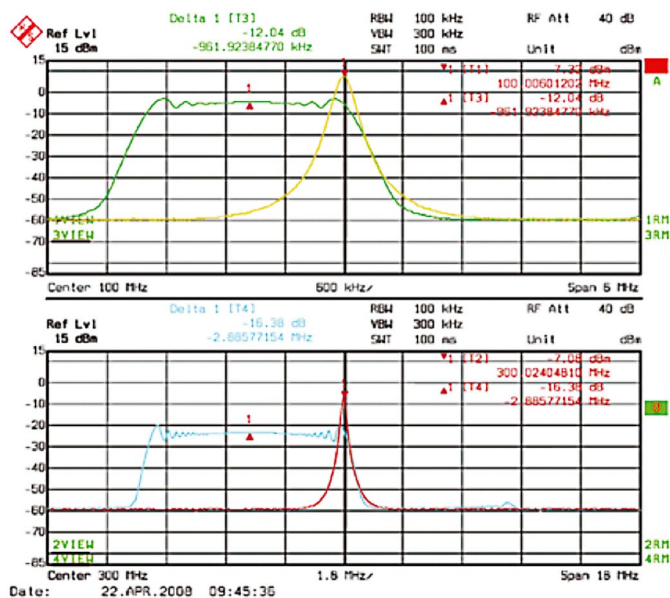


Рис. 5. Спектр первой и третьей гармоники для 100-МГц тактового сигнала с треугольным 2%-распределением спектра с понижением частоты и без распределения спектра

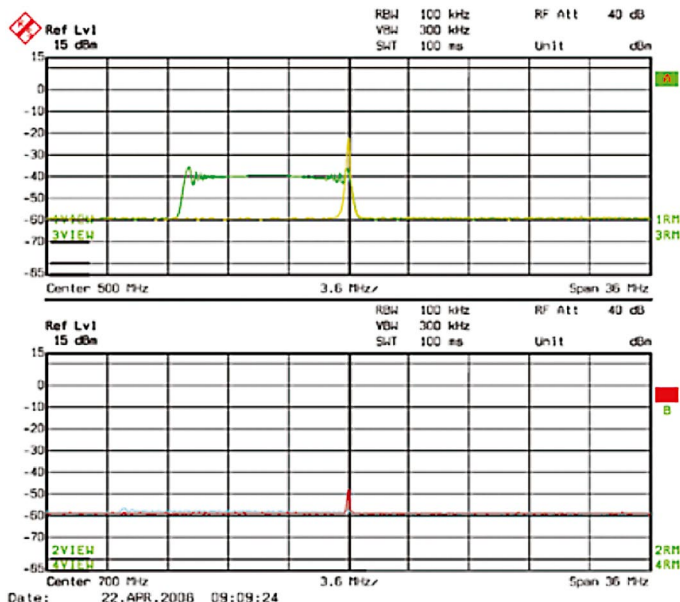


Рис. 6. Спектр пятой и седьмой гармоники для 100-МГц тактового сигнала с треугольным 2%-распределением спектра с понижением частоты и без распределения спектра

возможность адаптации к существенной разнице в тактовых частотах источника и приемника. Например, приемник может игнорировать или вставлять биты между пакетами передачи, чтобы динамически регулировать изменение частоты. В следующих стандартах ввода/вывода предусмотрены такие протоколы: DDR2, DDR3, PCI, PCI-X, PCI-Express, Serial ATA (SATA), полностью буферизованные DIMM (FBDIMM). Последний стандарт USB3.0 включает распределение спектра тактового сигнала как обязательную функцию. Использование распределения спектра для других типов интерфейсов ввода/вывода, в которых не предусмотрены специальные функции буферизации, не рекомендуется.

Джиттер тактового сигнала при распределении спектра часто оценивают

на основе понятия джиттера от периода к периоду (cycle-to-cycle jitter). Джиттер от периода к периоду определяется как изменение одного периода тактового сигнала относительно предыдущего периода. Поскольку частота модуляции при распределении спектра обычно довольно низка, влияние распределения спектра на два соседних периода практически одинаково, и поэтому их разница весьма нечувствительна к модуляции спектра тактового сигнала.

Для фильтрации фазовой модуляции при распределении спектра можно использовать характеристику фильтра, которая имеет частоту излома 3 дБ и 1/4 тактовой частоты и скорость затухания 40 дБ/декада при малом смещении частоты. Это позволяет уменьшить

влияние джиттера тактового сигнала на синхронизацию критических каналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Излучение ЭМП может привести к вредному взаимному влиянию электронных систем, расположенных близко друг от друга. Чтобы обеспечить возможность нормальной работы нескольких систем в непосредственной близости друг от друга, необходимо, чтобы излучение ЭМП от каждой системы соответствовало предельно допустимым величинам, определяемым отраслевыми или правительственными организациями.

Что касается основных методов подавления ЭМП, то экранирование — это довольно дорогостоящий метод, и зачастую его трудно применить из-за физических ограничений системы. Фильтрация сигналов требует дополнительного пространства на ПП и компонентов, а также может увеличить энергопотребление. Обеспечение непрерывного слоя заземления является эффективным методом, который необходимо использовать при проектировании ПП. Однако, это решение не всегда практично, т.к. может привести к увеличению числа слоев земли и таким образом — увеличению стоимости платы.

Увеличение времени нарастания/спада тактового сигнала — весьма эффективный метод снижения ЭМП на гармониках высшего порядка без увеличения потребляемой мощности или применения дополнительных компонентов на плате. Однако этот метод возможен только если в тактовых буферах, буферах данных, а также в системах ввода/вывода предусмотрена регулировка времени нарастания/спада сигнала.

Все методы, рассмотренные выше, ограничены определенными проводниками на плате. В отличие от этих подходов распределение спектра тактового сигнала позволяет уменьшить уровень ЭМП в рамках системы, т.к. модуляция распространяется на все сигналы, синхронные с тактовым, независимо от того, где они расположены в системе. Этот метод, кроме того, снижает помехи как на основной, так и на высших гармониках.

Основным недостатком распределения спектра тактового сигнала является то, что его использование ограничено системами, в которых применяются интерфейсы ввода/вывода со специальными буферными функциями, которые позволяют динамически управлять изменением частоты, вызванным модуляцией спектра. Например, этот метод нельзя использовать для интерфейсов Ethernet и высокоскоростного USB 2.0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sassan Tabatabaei. Clocking Strategies for EMI Reduction//interferencetechnology.com