

УДК 681.3.07

ЭКРАНИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

*Ботвинёнок А.А., Курпичников А.П., институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, e-mail: snv@ipr.ru.*

В отличие от систем управления на малопотребляющих микроконтроллерах и многих других применений цифровых систем, специфика изделий ЦОС заключается в использовании большого вычислительного ресурса для обработки сигналов в реальном времени в сочетании с наличием аналоговых цепей и датчиков вблизи – как причин и сигналов для последующей обработки. Немаловажным является и то, что для дискретизации используются устройства с широкополосным входом (УВХ АЦП), для которых характерно, помимо прочих проблем помехоустойчивости, перемножение сигнала с помехой, что существенно усложняет ситуацию с обработкой. На помощь приходят сложные алгоритмы и новейшая элементная база с сотнями миллионов транзисторов, нанотехнологическими проектными нормами и низковольтным питанием (0,9 В и ниже).

Однако, наряду с благом возрастающих вычислительных возможностей и уменьшении потребляемой мощности и стоимости, современная элементная база (в части вычислителей) несёт в себе скрытую угрозу – существенно сниженную устойчивость к воздействиям ЭМИ. Расширение рабочей полосы логических схем, снижение паразитных емкостей и пороговых уровней при общем сохранении размеров кристалла дают оценку снижения устойчивости к ЭМИ на 2 порядка и более. Таким образом, цифровая часть и, в частности, элементы ЦОС, из генераторов помех превращаются в хорошие приемники приходящих извне помех (что часто проявляется в статистике сбоев при выполнении алгоритмов).

Кроме того, всё большее развитие приобретают различные беспроводные технологии обмена данными, поэтому зачастую в едином устройстве сосредоточены разнородные модули: радиointерфейсы и вычислители, что приводит к дополнительному воздействию ЭМИ на вычислительные средства.

Решение проблемы, на первый взгляд, кажется очевидным – экранирование, тем более, что большинство литературных источников даже для простого однослойного экрана приводят цифры эффективности 60-80 дБ и более. Но в массе практических случаев это не соответствует действительности.

Рассмотрим простейший случай, когда на поверхность замкнутого экрана (плоская коробочка, припаянная к слою заземления на плате) падает плоская электромагнитная волна. Экранирующий эффект складывается в основном из отражения от внешней поверхности экрана, поглощения внутри экрана и повторного (многократного) отражения от внутренней поверхности экрана [1]:

$$A_{\text{дб}} = A_{\text{отр}} + A_{\text{погл}} + A_{\text{м.отр}} \quad (1)$$

Если рассмотреть каждую составляющую в отдельности, то в соответствии с [2]:

$$A_{\text{отр}} = 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{\sqrt{(\sigma + j\omega\varepsilon)\varepsilon_0}}{4\mu_0 \sqrt{4j\omega\mu}} \right| \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, μ_0 – магнитная постоянная, ε, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости экрана, σ – удельная проводимость материала экрана, ω – круговая частота электромагнитного поля. При подстановке констант в (2) получим приближительное равенство [1]:

$$A_{\text{отр}} = 20 \log_{10} \left(94.25 \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} \right) \quad (3)$$

Потери на поглощение и многократное отражение при этом составляют [1]:

$$A_{\text{погл}} = 6.16d\sqrt{\omega\mu\varepsilon}, \text{ где } d - \text{толщина экрана} \quad (4)$$

$$A_{\text{м.отр}} = 20 \log_{10} (1 - e^{-2d/\sigma}) = 20 \log_{10} (1 - e^{-d\sqrt{2\omega\mu\sigma}}) \quad (5)$$

При этом многократное отражение здесь является отрицательным, т.е. паразитным эффектом, ухудшающим экранирование.

График зависимости эффективности экранирования для электрического поля медным экраном толщиной 0.5 мм от частоты при расстояниях от источника **более одной длины волны (!)** приведён на рис. 1 [2]. Исходя из приведённого графика, эффект такого экрана (верхняя кривая) всегда больше 100 дБ, чего в большинстве случаев более чем достаточно.

Однако, всё вышеизложенное справедливо только в том случае, если на экран падает плоская электромагнитная волна, а это, как раз, означает, что расстояние от экрана до источника излучения превышает λ_0 . Таким образом, например, для радиомодуля GSM (900 МГц) или Wi-Fi (2.4 ГГц) всё вышесказанное соответствует случаю, когда источник излучения (усилитель мощности, антенна модуля) и экран разнесены более чем на 33 см и 13 см соответственно. Однако, в современных компактных конструкциях даже расстояние от аналоговых цепей датчиков и элементов ЦОС до встроенных радиointерфейсов на плате может быть меньшим. Более того, на практике, при применении беспроводных интерфейсов производится экранирование самого радиомодуля с расстояниями менее 1-2 см от внутренних источников ЭМИ (выходной усилитель, связи) до экрана. Это значит, что для оценки эффективности подобных экранов такие рассуждения не подходят, поскольку источник находится в так называемой «ближней зоне» по отношению к экрану. Отметим здесь, что и большинство рассматриваемых при конструировании изделий ЦОС случаев в отношении помех также подпадают под это определение, и исключение составляют разве что достаточно удалённые от устройства радиостанции и станции сотовой связи.

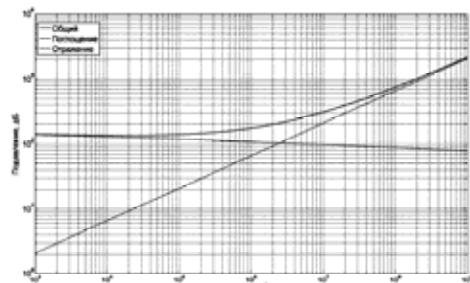
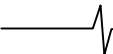


Рис. 1. Зависимость подавления плоской электромагнитной волны медным экраном толщиной 0,5 мм

В простом приближении, опустив рассуждения о переходной зоне, экранирование в ближней зоне отличается импедансами электрического и магнитного полей, которые соответственно равны [2]: $\hat{\eta}_e = 60 \frac{\lambda_0}{r}$, $\hat{\eta}_m = 2369 \frac{r}{\lambda_0}$, где r – расстояние



от источника до экрана, а λ_0 – длина волны излучения. При этом, потери на поглощение электрического поля $A_{\text{погл}}$ остаются такими же, как в дальней зоне, а потери отражения для него составляют ещё больше:

$$A_{\text{отр}} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{\mu}}{4\epsilon r \sqrt{\omega \sigma}} \right) \quad (6)$$

Но главной проблемой в ближней зоне является магнитное поле, подавление которого требует более серьёзных и многослойных экранов. Потери магнитного поля в ближней зоне для упоминавшегося выше медного экрана можно оценить выражением [2, 5]:

$$A_{\text{отр}} = 14.6 + 10 \log_{10} (fd^2) \quad (7)$$

На рис. 2 представлена зависимость подавления магнитной составляющей помехи для медного экрана в зависимости от частоты излучения для различных дистанций до источника. При этом, поскольку источником может быть соседний проводник, для минимального расстояния 2.5 мм показаны также экспериментальные результаты [5] как для медного так и для стального экранов.

Именно магнитное поле может вызывать в системе ЦОС не только наводки в аналоговых цепях (в том числе воздействуя на катушки индуктивности фильтров, дроссели) и индуцировать разность потенциалов на выводах усилителей, но также вывести из строя чувствительные и высокотехнологичные элементы ЦОС. В случае наличия исполнительных устройств с коммутацией тока, внешние наводки от них могут вызвать даже «защёлкивание» КМОП микросхем.

Рассмотрим случай, когда находящийся вблизи платы ключевой МОП транзистор коммутирует ток 20 А (при этом фронт импульса может составлять 20 нс), и пути тока проходят на расстоянии 1 см от параллельной шины процессора с логическими уровнями 3.3 В, ширина разводки которой на РСВ при этом составляет 1 см, а длина, например, 10 см. В этом случае индуцированную ЭДС в шине можно оценить как уровень 5 В и более, что, в случае повторяющегося процесса или ШИМ, может привести не только к помехам на шине, но и к кратковременному (до выключения питания) или полному выходу из строя процессора. Есть повод задуматься о влиянии поля непосредственно на незащищенное ядро процессора ЦОС (под эпоксидным корпусом – кристалл с линейными размерами внутренних связей 0,5 см), где пороговые уровни логики всего 0,3 В!

Всё вышесказанное имеет в своей основе существенную идеализацию – замкнутость экрана. В реальности экраны редко бывают замкнутыми и имеют щели, вентиляционные отверстия, каналы ввода кабелей, плохо экранированные окна под дисплей и т.п. В таком случае, эффективность экрана определяется именно наличием таких отверстий. Количественную оценку эффективности экрана с отверстиями можно получить из следующих выражений [4]:

$$S = A_{\text{отр}} + A_{\text{погл}} + A_{\text{множ.отр}} + K1 + K2 + K3 \quad (8)$$

где $A_{\text{отр}} = 20 \log_{10} [1 + 4K^2] / 4K$ – потери на отражение, а K выбирается по следующим правилам: $K = W / \pi r$ – для низкоимпедансных полей и прямоугольного отверстия длиной W ; $K = D / 3.682r$ – для низкоимпедансных полей и круглыми отверстиями диаметром D ; $K = j6.69 \times 10^{-5} fW$ – для плоской электромагнитной волны и прямоугольного отверстия длиной W на частоте f ; $K = j5.79 \times 10^{-5} fD$ – для плоской электромагнитной волны и круглого отверстия диаметром D на частоте f .

Потери поглощения зависят от формы и размеров отверстия: $A_{\text{погл}} = 27.3 \text{ дБ} / W$ для $f < f_c$, прямоугольного отверстия длиной W ; $A_{\text{погл}} = 32 \text{ дБ} / D$ для $f < f_c$ – для круглого отверстия

диаметром D . d – глубина отверстия. При этом $f_c = \frac{c}{2W}$ для

прямоугольных отверстий, и $f_c = \frac{c}{3.4D}$ для круглых отверстий.

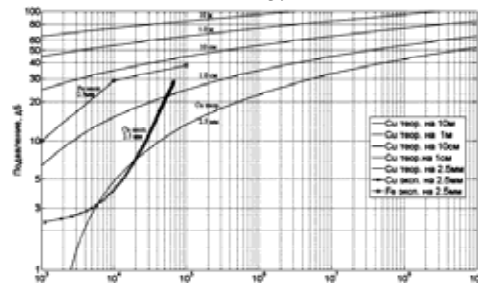


Рис. 2. Зависимость подавления магнитного поля экраном 0,5 мм от частоты для ближней зоны

При эффект множественного отражения также влияет:

$$A_{\text{множ.отр}} = 20 \log_{10} \left[1 - \frac{K-1}{(K+1)^2} 10^{-A_{\text{погл}}/10} \right] \text{ дБ, при } A_{\text{погл}} < 15 \text{ дБ, а}$$

поправочные коэффициенты $K1$, $K2$, $K3$ определяются следующим образом: $K1 = -10 \log_{10} an$ – для удалённых источников ($r \gg D$, $r \gg W$), где a – площадь отверстия, n – количество отверстий на 1 см^2 . Для близких источников этот член следует опускать.

$K2 = -20 \log_{10} (1 + 35p^{-2/3})$ дБ, где p – отношение минимального диаметра (лощины) проводника сетки к глубине скин-слоя в материале.

$K3 = 20 \log_{10} (\coth(A_{\text{погл}} / 8.69))$ дБ – поправочные коэффициенты, описывающий связь между соседними отверстиями экрана, что особенно актуально, например, для рядов вентиляционных отверстий.

Отдельно стоит сказать о вертикальных металлических перегородках. Экранирующий эффект таких незамкнутых экранов обуславливается дифракционными потерями и может быть оценен с достаточной точностью только для случая падения электромагнитной волны т.е. в случае дальней зоны. Дифракционные потери можно оценить, используя зоны Френеля.

Рассматривая излучение и прием помехи, безусловно, следует учитывать также взаимное расположение проводников разводки, как наиболее явных «конструкционных» антенн. Помимо этого, важным эффектом при подавлении помехи является резонанс внутри экрана. Для пустого объема (а это, разумеется, лишь очередное упрощение) резонансная частота определяется выражением [3]:

$$F = 150 \sqrt{(k/l)^2 + (m/h)^2 + (n/w)^2} \text{ МГц,} \quad (9)$$

где l , h , w – размеры корпуса в метрах, а k , m , n – числа, определяющие моду возникающего колебания. При этом, чем выше эффективность отражения поверхности экрана, тем большую добротность будет иметь резонансный контур, увеличивая избирательность системы к ЭМИ и сводя на нет эффект экранирования на волновых максимумах.

Литература

1. «Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи», В.И. Кравченко, А.Е. Болотов, Н.И. Летунова, М.: Радио, 1987г.
2. «Introduction to Electromagnetic Compatibility» Clayton R. Paul, «A Wiley Interscience publication», 1992
3. «ЭМС для разработчиков продукции», Т. Уильямс, перевод с английского Кармашев В.С., Кечиев Л.Н. М.: Технологии, 2003 г.
4. «Principles of Electromagnetic Compatibility», В. Keiser, 3rd edition, Artech House Inc., 1987
5. «Noise reduction techniques in electronic systems» Н.В. Ott, 2nd edition, 1988.