

ИЗМЕРЕНИЕ СЛАБОТОЧНЫХ СИГНАЛОВ

ГЕННАДИЙ ДЕНИСОВ, ведущий специалист, ООО «ЛАД»

В статье рассмотрены вопросы измерения сигналов малой величины. В этом случае на результаты измерения могут существенно повлиять не только электромагнитные помехи, но и собственные шумы компонентов электронной схемы. Последние далеко не всегда принимаются в расчет при проектировании и иной раз уже на стадии испытания готового изделия ошибочно причисляются к электромагнитным помехам, отчего методы борьбы с ними оказываются неэффективны.

ВВЕДЕНИЕ

По ряду причин, например для уменьшения потребляемой мощности при питании от аккумуляторных батарей, во многих изделиях снижается напряжение питания. Соответственно уменьшается максимальная величина полезного сигнала и входная шкала АЦП, что, в свою очередь, приводит к уменьшению величины дискреты АЦП. Если при питании ± 15 В входная шкала АЦП может составлять ± 10 В, и величина дискреты 12-разрядного АЦП составляет 5 мВ, то при однополярном питании 2,5 В (что характерно для устройств, питающихся от аккумуляторных батарей) и входной шкале 12-разрядного АЦП — 2 В, цена дискреты уменьшится до 0,5 мВ.

Однако при уменьшении напряжения питания шумы и помехи практически не уменьшаются. Любой компонент электрической схемы является генератором шума. Изменение тока или напряжения цепи порождает электромагнитные помехи. Таким образом, уменьшение напряжения питания влечет за собой уменьшение полезного сигнала, но собственные шумы схемы не снижаются, а электромагнитные помехи, как правило, уменьшаются не столь сильно, как напряжение питания. Следовательно, при проектировании схемы необходимо учитывать шумы и помехи, которым раньше можно было пренебречь.

ШУМЫ

Самый простой элемент электрической цепи — резистор является генератором теплового белого шума со спектральной плотностью:

$$e_n = \sqrt{4kTR}, \text{ нВ}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где $k = 1,374 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — температура, выраженная в градусах Кельвина; R — величина сопротивления резистора.

Запомним, что резистор величиной 1 МОм при комнатной температуре 25°C или 298 К генерирует шум со

спектральной плотностью 127 нВ/ $\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$ и используя формулу (1), можно вычислить шум резистора с иным номиналом при другом значении температуры. Например, спектральная плотность шума, генерируемая резистором 10 кОм, составляет 12,7 нВ/ $\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$.

Протекающий в цепи ток, в силу своей квантовой природы, порождает т.н. дробовой шум, спектральная плотность которого выражается формулой (2):

$$i_n = \sqrt{2qI}, \quad (2)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; I — ток, протекающий в цепи.

Полупроводниковый переход, смещенный в обратном направлении, генерирует шум Шоттки. Отметим также 1/f-шум, или, как его иногда называют, розовый шум. Он преобладает на низких частотах, и его природа до конца не ясна. Более подробные сведения о шумах можно получить, например, в [1].

Зная спектральную плотность шума, легко вычислить его среднеквадратичную величину E в заданной полосе частот.

$$E_n = e_n \sqrt{\Delta f}, \quad (3)$$

где Δf — полоса частот со спектральной плотностью e_n .

При последовательном включении источников шума результирующий шум определится из (4):

$$E_n = \sqrt{E_{1n}^2 + E_{2n}^2 + 2\sigma E_{1n} E_{2n}}, \quad (4)$$

где σ — коэффициент корреляции между шумами; обычно в электронных схемах $\sigma = 0$.

Учитывая сказанное, понятно, что любой электронный компонент — операционный усилитель (ОУ), компаратор, АЦП и т.д. имеет собственные шумы по напряжению и по току. Обычно эти параметры приводятся производителем в технической документации.

Схематично типичная кривая спектральной плотности шума ОУ приведена на рисунке 1. Частота F_c называется частотой перегиба: в спектральной плотности шума правее этой точки превалирует белый шум, величина которого не зависит от частоты. Левее частоты перегиба преобладает шум 1/f. Его спектральная плотность выражается формулой (5):

$$e_n = K\sqrt{FC/f}, \quad (5)$$

где K — коэффициент пропорциональности; f — текущее значение частоты.

Минимальное значение частоты f обычно задается производителем на графике спектральной плотности шумов, приводимом в документации, или в таблицах технических данных. Для получения величины шума в полосе частот (f_2 ; f_1), заметим, что $f_2 > f_1$. Проинтегрируем (5) и получим:

$$E_n = e_n \sqrt{F_c \ln(f_2/f_1)}. \quad (6)$$

Помимо спектральной плотности и среднеквадратичного значения, шум характеризуется максимальным значением выбросов от пика до пика E_{p-p} ; этот выброс можно наблюдать на экране осциллографа в виде неперiodических всплесков. E_{p-p} практически невозможно вычислить, и производители приводят экспериментальные значения, полученные в течение определенного времени наблюдения. Если это величина не задана, то с вероятностью 99,7% она не превысит значения $6,6E_n$.

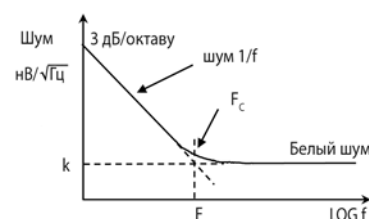


Рис. 1. Кривая спектральной плотности шума ОУ



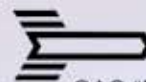
НАДЕЖНОСТЬ КАЧЕСТВА



AMERICAN
TECHNICAL
CERAMICS

КЕРАМИЧЕСКИЕ ВЧ КОНДЕНСАТОРЫ

МИКРОСХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ



ОАО "Восход"



МИКРОПРОЦЕССОРЫ

РАЗЪЕМЫ



ИСЕТЬ



ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

МИКРОСХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ



ИНТЕГРАЛ



ТЕПЛОПРОВОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

МИКРОСХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ



Кремний



МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ АВИОНИКИ

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



КУЛОН



ВСЕ ДЛЯ СВЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ

ТАНТАЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ
КОНДЕНСАТОРЫ



СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



Монолит



РАЗЪЕМЫ И СОЕДИНИТЕЛИ

МИКРОСХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ



НЗПП



ВСЕ СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

МИКРОСХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ



ОБЪЕДИНЕНА



ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ И СНАББЕРЫ

ТАНТАЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



ЭЛЕКОНД



Комплектные поставки электронных компонентов

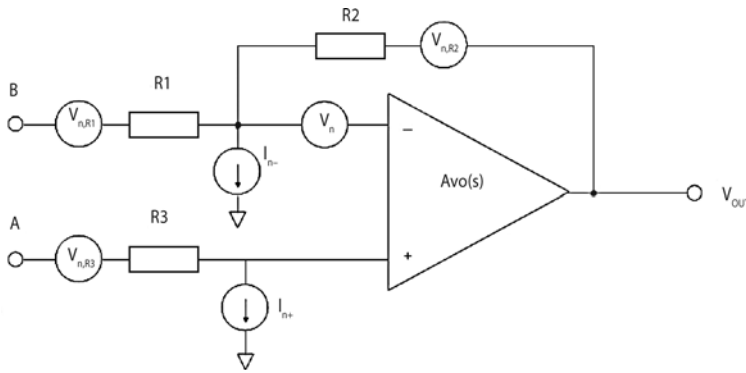


Рис. 2. Пример вычисления шума

Из (3) следует, что для уменьшения среднеквадратичного значения шума необходимо ограничить полосу пропускания, для чего применяют фильтры. Если используется только переменная составляющая сигнала, крайне желательно применить фильтр высоких частот для уменьшения составляющей шума 1/f. Однако следует помнить, что полоса пропускания шума в 1,57 раза превышает полосу пропускания фильтром полезного сигнала.

В зависимости от технологического процесса изготовления, ОУ имеют различные шумовые характеристики. В таблице 1 приведены их характерные значения [2] для ОУ компании ADI. Выбор ОУ для измерения малых сигналов — задача отнюдь не тривиальная. Рассмотрим вычисление шума в схеме, приведенной на рисунке 2. Для наглядности рядом с каждым компонентом схемы нарисован эквивалентный генератор шума: V_n ; I_{n-} ; I_{n+} — шумовые параметры ОУ, при-

веденные изготовителем; V_{nR} — шум резистора, вычисленный из (1). Обычно $I_{n-} = I_{n+}$. Шумы суммируются в соответствии с (4) исходя из того, что корреляция между ними отсутствует: $\sigma = 0$. Окончательно получаем величину шума, приведенного ко входу E_{in} [2]. Коэффициент усиления шума $K_{ш} = 1 + R_2/R_1$.

$$E_{in} = \sqrt{1,57BW} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{V_n^2 + 4KTR_3 + 4KTR_1(R_2/(R_1+R_2))^2 + I_{n+}^2 + \sqrt{I_{n-}^2(R_1R_2/(R_1+R_2))^2 + 4KTR_2(R_2/(R_1+R_2))^2}}{2}} \quad (7)$$

где BW — полоса пропускания ОУ с замкнутой обратной связью.

Для получения шума на выходе ОУ выражение (7) следует умножить на $K_{ш} = 1 + R_2/R_1$.

Вычислениями (7) определение шума не заканчивается, т.к. в нем учтен только белый шум и не учтен шум 1/f. Его получают, используя выражения (5) и (6), а затем полученный результат суммиру-

ется с (7) по формуле (4) с учетом $\sigma = 0$. Окончательно получаем:

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_{in}^2 + E_{1/f}^2} \quad (8)$$

При расчете шумов не следует ограничиваться рассмотрением только белого шума. Очень важен шум 1/f, особенно если необходимо измерять сигнал на низких частотах. В этом случае вполне может случиться, что ОУ, имеющий лучшие показатели на частоте от 0,01 Гц и выше, окажется непригоден для работы при более низких частотах. В таблице 2 приведены выбросы шумов от пика до пика для биполярного ОУ AD707 и ОУ с автоматической подстройкой нуля (чоппер) AD8551 [2]. Как видно из приведенного примера, выбор не всегда прост.

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Во многих случаях датчики расположены на довольно значительном расстоянии от основного оборудования, а расстояние по кабелю еще более, и часто значительно, увеличивает эту дистанцию. Поэтому для защиты от помех измерительные цепи датчика соединяют с оборудованием экранированным кабелем. Однако не все так просто, как может показаться на первый взгляд.

На рисунке 3 [3] показана обычная схема использования экранированного кабеля. Видно, что земля образует замкнутый контур, протекая по которому, ток, попадающий на экран через паразитную емкость или наведенный внешними помехами, создает падение напряжения V_{cm} . Последнее

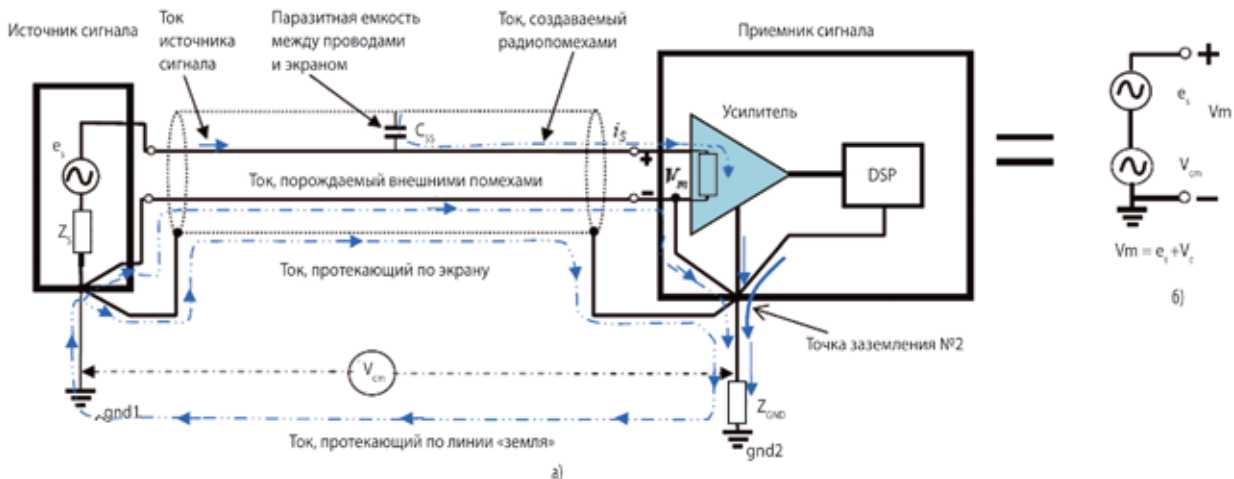


Рис. 3. Соединение датчика и приемника экранированным кабелем, заземленным с обеих сторон (а), и эквивалентная схема источника сигнала (б)

Таблица 1. Параметры шума ОУ компании ADI

Наименование	e_n , нВ/√Гц	i_n , пА/√Гц	F_c , Гц	Входной каскад
AD8599	1	1,5	9	Биполярный
AD8655	2,7	0,007	2000	КМОП
AD8610	6	0,005	1000	Полевые транзисторы с р-п-переходом

Таблица 2. Шумовые параметры ОУ при различных частотах

Частотный диапазон, Гц	Величина шума пик-пик, мкВ	
	AD707	AD8551/2/4
0,1...10	0,238	1,04
0,01...1	0,135	0,33
0,001...0,01	0,12	0,104
0,0001...0,001	0,118	0,033

ГАРАНТИРОВАННОЕ КАЧЕСТВО И НАДЕЖНЫЙ СЕРВИС

Москва
 ООО «Клевер Электроникс»
 Тел.: +7 (495) 952-59-99
 E-mail: info@clever.ru
 www.clever.ru

ООО «Электрон-Сервис-Технология»
 Тел.: +7 (495) 737-93-99
 E-mail: techno@estek.ru
 www.elservtechno.ru

Санкт-Петербург
 ООО «Универсалприбор»
 Тел.: +7(812)334-55-66
 E-mail: pribor@pribor.ru
 mebel@pribor.ru
 www.pribor.ru

Представитель Treston в России
 Тел./Факс: +7 (812) 458-50-25
 Моб.тел. +7 (905) 269 25 86
 E-mail: elena.chernova@treston.com
 www.treston.com

Калининград
 ООО «Интертекс Электроникс»
 Тел./Факс: +7 4012 987-147,
 +7 4012 987-150
 E-mail: seq.int@gmail.com
 www.i-ts.ru

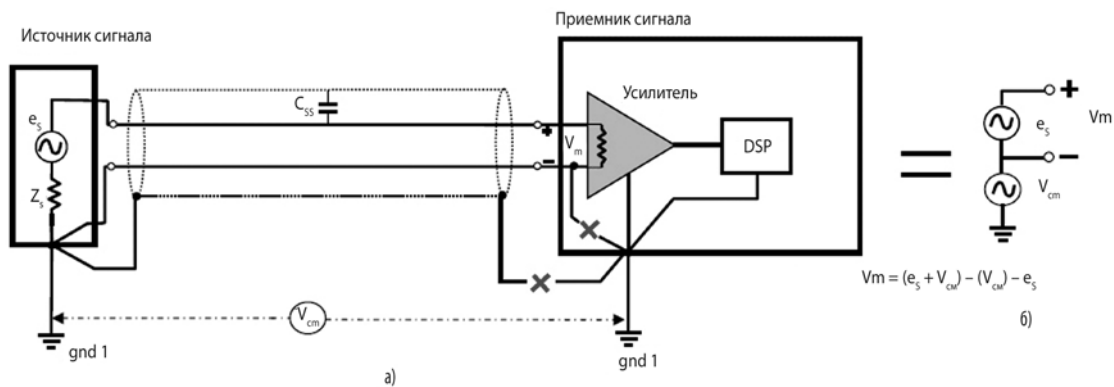


Рис. 4. Соединение датчика и приемника экранированным кабелем, заземленным с одной стороны (а), и эквивалентная схема источника сигнала (б)

суммируется с измеряемым сигналом и создает дополнительную погрешность (см. рис. 3б). На рисунке 4 показано решение этой проблемы — экран кабеля заземлен только с одной стороны, поэтому не образуется земляная петля с током, а разности потенциалов земли не суммируются с источником сигнала.

К сожалению, в распределенных системах, особенно в промышленной автоматике, земля не эквипотенциальна — часто по правилам техники безопасности электрооборудование требуется заземлять, из-за чего по земле иной раз протекают значительные токи, которые и создают разницу потенциалов V_{cm} между различными точками земли. При соединении кабеля в соответствии с рисунком 4 величина V_{cm}

не суммируется с источником сигнала, но добавляется в синфазную составляющую сигнала, что также вызывает дополнительную погрешность.

Если источник сигнала плавающий (выход не привязан к общему выводу питания, или датчик не запитывается, например, термopара), и его нельзя заземлять, то в качестве приемника лучше использовать инструментальный усилитель, привязав оба его входа к земле резисторами с сопротивлением более 1 МОм. В этом случае желательно использовать ОУ с минимальными входными токами.

Необходимо использовать прецизионные резисторы с допуском менее 1%, т.к. они вкпе с выходным сопротивлением источника сигнала образуют дели-

тель напряжения, и большой разброс приведет к увеличению ошибки измерения. Если же источник сигнала привязан к земле, то соединять входы усилителя с ней не следует. В случае когда есть выбор, наилучшее решение — привязка к земле источника сигнала, т.к. использование высокоомных резисторов ведет к возрастанию шумов (1).

При дифференциальном источнике сигнала измерительный тракт должен быть сбалансирован: выходы источника сигнала, сигнальные линии и входы усилителя должны быть попарно симметричными — обладать одинаковым импедансом относительно земли.

Ответ на вопрос, каким образом заземлять кабель, не всегда очевиден, т.к. зави-

Непревзойденные возможности в своем классе

Протестируйте прибор перед покупкой. Подробности у авторизованных дистрибуторов в России.



Новая серия осциллографов для анализа систем со смешанными сигналами по невероятно низкой цене...

В этой ценовой категории можно ожидать, что у новых приборов серии MSO/DPO будут скромные возможности. Однако, это не так. Полоса пропускания до 200 МГц, частота дискретизации 1 Гвыб/с, 4 аналоговых и 16 цифровых каналов – этого более чем достаточно для отладки систем со смешанными сигналами. Кроме того, эти приборы, также как и представители серий DPO3000 и MSO/DPO4000, имеют дополнительные функции, например, Wave Inspector®, обеспечивающую удобную навигацию по длинной памяти и автоматическое декодирование для последовательных интерфейсов. Благодаря подобным характеристикам приборы серии MSO/DPO2000, несомненно, превзойдут все Ваши ожидания.

Новая серия MSO/DPO2000 с функциями отладки последовательных интерфейсов и систем со смешанными сигналами

Серия MSO4000/DPO4000		Серия DPO3000		НОВИНКА! Серия MSO2000/DPO2000	
Полоса пропускания	от 350 МГц до 1 ГГц	Полоса пропускания	от 100 до 500 МГц	Полоса пропускания	от 150 до 200 МГц
Аналоговые каналы	2, 4	Аналоговые каналы	2, 4	Аналоговые каналы	2, 4
Цифровые каналы	16 (серия MSO4000)	Цифровые каналы	—	Цифровые каналы	16 (серия MSO2000)
Длина записи	10 млн. точек на всех каналах	Длина записи	5 млн. точек на всех каналах	Длина записи	1 млн. точек на всех каналах
Дисплей	10,4 дюйма	Дисплей	9,0 дюйма	Дисплей	7,0 дюйма
Система запуска и декодирования по последовательным интерфейсам	PC, SPI, RS-232/422/485/UART, CAN, LIN, FlexRay	Система запуска и декодирования по последовательным интерфейсам	PC, SPI, RS-232/422/485/UART, CAN, LIN	Система запуска и декодирования по последовательным интерфейсам	PC, SPI, RS-232/422/485/UART, CAN, LIN



Заказывайте демонстрацию приборов
E-mail: info@master-tool.ru
www.master-tool.ru
Тел: +7 (495) 926-7185; 154-5181
Факс: +7 (495) 926-7185; 154-0201

Познакомьтесь с MSO/DPO2000.
Виртуальная демонстрация прибора на сайте:
www.tektronix.com/moreforless



Tektronix

Приглашаем на выставку «ЭкспоЭлектроника», 13–16 апреля 2009 (нав. 3, зал 13, стенд F23)

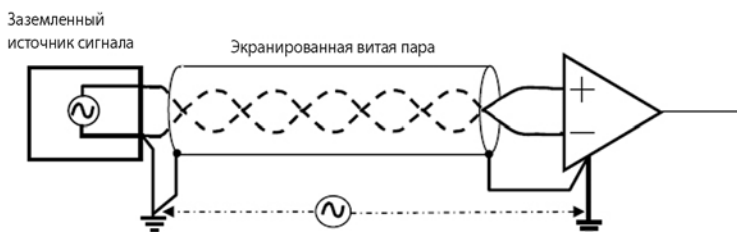


Рис. 5. Экранированная витая пара, заземленная в двух точках

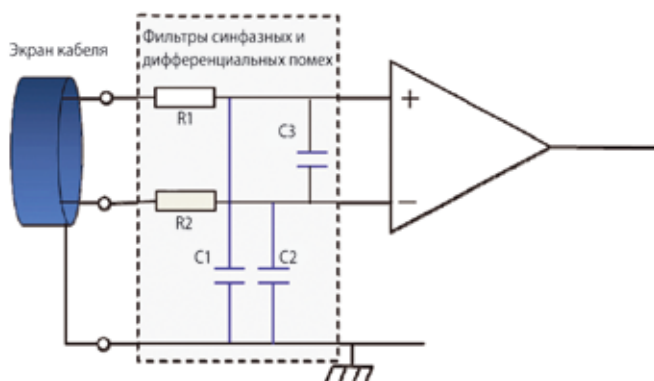


Рис. 6. Фильтрация синфазных и дифференциальных помех

сит от электромагнитной обстановки. Например, результаты испытаний многих систем сбора данных показали эффективность схемы на рисунке 5. Ослабление помех в этом случае было примерно на 40 дБ больше, нежели при заземлении витой пары только в одной точке — около

усилителя или около источника. Поэтому, если нет уверенности, какой из вариантов более подходит, следует экспериментальным путем выбрать наилучший. В [3] очень подробно рассмотрен этот вопрос.

И все же, несмотря на экранирование, величина помех может оказаться

чрезмерной и приведет к насыщению усилителя, а, следовательно, к потере сигнала. В этом случае приходится использовать пассивные RC-цепочки (см. рис. 6). Полоса пропускания синфазного BW_{CM} и дифференциального BW_{DM} сигналов приведена в выражениях (9) и (10).

$$BW_{CM} = 1/2\pi(R_1||R_2)(C_1||C_2) \quad (9)$$

$$BW_{DM} = 1/2\pi(R_1 + R_2)(2C_3 + C_2||C_1) \quad (10)$$

Необходимо отметить, что полосу пропускания фильтров следует выбирать много больше, нежели полосу пропускания полезного сигнала. В противном случае разброс элементов, особенно емкостей, приведет к сдвигу фазы на сигнальных линиях и погрешность измерения возрастет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буккингем М. Шумы в электронных приборах и системах — М.: Мир, 1986 с. 398.
2. Moghimi R. Understand noise optimization in sensor signal-conditioning circuits//www.planetanalog.com/showArticle.jhtml?articleID=211200322&cid=NL_planet.
3. Freeman J. Techniques to enhance op amp signal integrity in low-level sensor applications//www.planetanalog.com/showArticle.jhtml?articleID=212202250&cid=NL_planet.