

Улучшение возможностей беспроводных передатчиков

путем калибровки мощности

Имон Нэш (Eamon Nash)

При конструировании беспроводного передатчика важно измерение мощности высокочастотного сигнала и управление ею. Усилители мощности (УМ) высокой частоты работают исключительно в режиме разомкнутого контура, это означает, что в некотором смысле мощность, подводимая к антенне, не является наблюдаемой величиной. Такие внешние факторы, как требования регулирующих органов к количеству передаваемой энергии, устойчивости сети и взаимодействию с другими беспроводными сетями, делают необходимым жесткое управление мощностью трансмиттера. Кроме того, точное управление выходом высокочастотного сигнала может позволить улучшить спектральные характеристики, уменьшить стоимость и затраты энергии в усилителе мощности передатчика. Для обеспечения нужного уровня выходной мощности может потребоваться какая-либо форма фабричной калибровки УМ. Алгоритмы этой процедуры значительно различаются по сложности и эффективности. В предлагаемых указаниях по применению описывается типичная схема управления мощностью высокочастотного сигнала, а также сравниваются производительность и эффективность различных фабричных алгоритмов калибровки.

Типовой беспроводной передатчик со встроенным управлением мощностью

На рис. 1 показана блок-схема типового передатчика, обладающего функциями измерения и управления мощностью. Внутренний приемник обеспечивает непрерывную обратную связь на уровне тока, контролирующую уровень мощности на выходе. Для калибровки трансмиттера можно использовать внешний измеритель мощности совместно со встроенным. Небольшая часть сигнала отводится от УМ посредством направленной связанной пары (directional coupler) и подается на приемник высокочастотного сигнала. В этом случае связанная пара находится в непосредственной близости от антенны, но после удвоителя (duplexer) и изолятора. Сопутствующая потеря мощности учитывается соответствующей поправкой при калибровании.

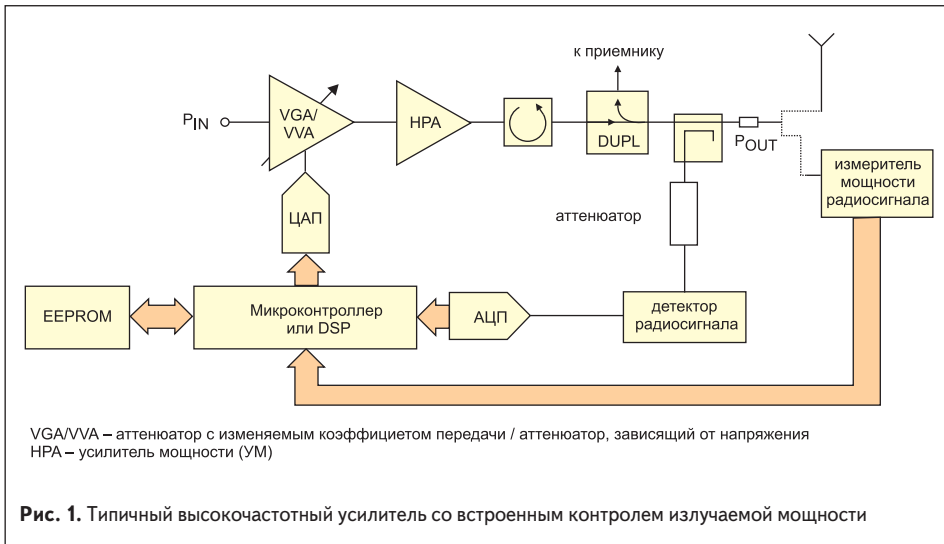
Направленная связанная пара обычно имеет коэффициент связи 20–30 дБ, следовательно, сигнал, проходящий через нее, на столько же слабее, чем в антенне. Такой способ отвода мощности вносит некоторые потери в тракт

передачи. Обычно они составляют несколько десятых децибела. При применении в беспроводной инфраструктуре, где наибольшая передаваемая мощность обычно составляет 30–50 дБм (1–100 Вт), сигнал, проходящий через направленную связь, все еще остается слишком большим для измерения высокочастотным детектором. Поэтому между ним и антенной необходим дополнительный аттенуатор.

Современные среднеквадратичные и не среднеквадратичные детекторы позволяют измерять мощность в диапазоне 30–100 дБ, при этом их выход не зависит от температуры и частоты. В большинстве случаев сигнал с них подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Выходные значения последнего, с использованием калибровочных коэффициентов, хранящихся в энергонезависимой памяти (EEPROM), преобразуются в значения передаваемой мощности. Они-то и сравниваются с установленным уровнем. Если есть отличия, то происходит подстройка мощности. Ее можно осуществить во многих точках по пути распространения сигнала. Например, изменить амплитуду немодулированных данных, управляющих радиоканалом, переменный коэффициент передачи усилителей ПЧ или ВЧ, а также коэффициент усиления УМ. При этом цепи обратной связи, регулирующие коэффициенты усиления, будут поддерживать передаваемую мощность в желаемых пределах. Важно отметить, что передаточные функции управления коэффициентом усиления УМ и управляемых напряжением аттенуаторов (voltage variable attenuator, VVA) часто являются достаточно нелинейными. Поэтому действительные изменения коэффициента усиления, произошедшие после подстройки, могут быть неопределенными. Это делает обязательным наличие управляющей обратной связи, обеспечивающей данными о произошедших изменениях последующий итеративный процесс.

Необходимость фабричной калибровки

В описанной выше типовой системе передатчика почти нет компонентов с очень хорошей, абсолютно точной характеристикой передаточного коэффициента. Рассмотрим случай, когда необходимо поддерживать изменение мощности в пределах ± 1 дБ. Абсолютный передаточный коэффициент устройств типа УМ, управляемых напряжением аттенуаторов, блоков усиления радиосигнала и других компонентов в цепи его распространения, может варьировать столь значительно, что изменения выходной мощ-



ности могут неожиданно превысить ±1 дБ. Вдобавок передаточный коэффициент тракта распространения сигнала может меняться также с температурой и частотой. В результате необходимо непрерывно наблюдать за излучаемой мощностью и управлять ею.

Калибровку выходной мощности можно определить как перенос точности внешнего эталона на калируемую систему. В данном случае антенна отключается и заменяется внешним эталонным измерителем, таким, как изображенный на рис. 1. При этом точность внешнего измерителя мощности переносится на внутренний детектор. В ходе процедуры калибровки устанавливаются несколько уровней мощности, снимаются показания измерителя мощности и детектора, которые затем помещаются в энергонезависимую память (EEPROM). После того как антенна возвращается на свое место, передатчик становится способен точно управлять своим выходом. В случае, если с температурой «уходит» коэффициент усиления, изменяется частота передачи или уровень желаемой выходной мощности, то встроенный калиброванный приемник высокочастотного сигнала действует

как внутренний измеритель мощности с абсолютной точностью, что всегда гарантирует излучение передатчиком запланированного уровня энергии, не выходящего за границы допуска. Заводская процедура калибровки описана в разделе «Калибровка петли управления мощностью радиосигнала». Прежде всего должны быть сняты характеристики типового детектора мощности радиосигнала. Его линейность и стабильность при изменении температуры и частоты значительно влияют на сложность программы калибровки и достигаемую в дальнейшем точность.

Передаточная функция приемника радиосигнала

На рис. 2. показана несколько гиперболизированная для наглядности передаточная функция приемника радиосигнала с логарифмическим выходом (log amp, логарифмического усилителя) при различной температуре. Передаточная функция логарифмического усилителя в пределах линейного рабочего участка может быть промоделирована с помощью простого уравнения первого порядка. Три кривые показывают зависимость выходного напряжения от входной мощности при +25, +85

и -40 °C. При температуре +25 °C выходное напряжение приемника изменяется от 1,8 В при входной мощности -60 дБм до 0,4 В при 0 дБм. Передаточная функция хорошо совпадает с воображаемой прямой, наложенной на график. Хотя она отклоняется от прямой в самом конце, но следует отметить, что также есть признаки нелинейности и при уровнях мощности, лежащих между -10 и -5 дБм.

Быстрый подсчет показывает, что этот детектор имеет наклон характеристики примерно -25 мВ/дБ, т. е. при изменении входной мощности на 1 дБ выходное напряжение изменится на 25 мВ. Этот наклон остается постоянным на линейной части динамического диапазона. Таким образом, несмотря на несколько худшую линейность, обнаруживаемую в районе -10 дБм, поведение передаточной функции при +25 °C может моделироваться уравнением:

$$V_{out} = Slope \times (P_{in} - Intercept),$$

где *Intercept* — точка, в которой экстраполированная прямая пересекает ось *x* (рис. 2). Следовательно, передаточная функция приемника может моделироваться этим простым уравнением первого порядка, что весьма полезно с позиций перспектив калибрования, поскольку при этом можно определить передаточную функцию детектора, приложив и измерив всего лишь два уровня мощности.

Теперь давайте обсудим поведение воображаемого приемника при изменении температуры. Отметим, что при входной мощности -10 дБм выходное напряжение изменяется примерно на 100 мВ, как в случае понижения температуры до -40 °C, так и ее повышения до +85 °C. Исходя из предыдущего расчета наклона (-25 мВ/дБ), это эквивалентно девиации измеряемой мощности на ±4 дБ, что приемлемо для большинства реальных систем. На практике же необходим детектор с передаточной функцией, имеющей минимальный дрейф с температурой. Такой подход гарантирует, что процедура калибрования передатчика, выполненная при нормальной температуре, будет также действительна при ее изменении. Это позволяет проводить данную процедуру на заводе в обычных условиях, без дорогих и затратных по времени циклов калибрования при охлаждении и нагреве. Если трансмиттер является быстро перестраиваемым по частоте и необходимо, чтобы он работал при нескольких ее значениях в пределах заданной полосы, то пользователю надо обратить внимание на поведение приемника при ее изменении. В идеальном случае должно использоваться устройство, чей отклик несущественно изменяется внутри определенной полосы частот. Это позволит проводить калибровку трансмиттера на единственной частоте (в общем случае на середине диапазона) и гарантирует, что при изменении частоты его точность ухудшится ненамного или этого совсем не произойдет.

В таблице приведены рабочие диапазоны и значения температурной стабильности различных приемников фирмы Analog Devices со среднеквадратичным и не среднеквадратичным выходом.

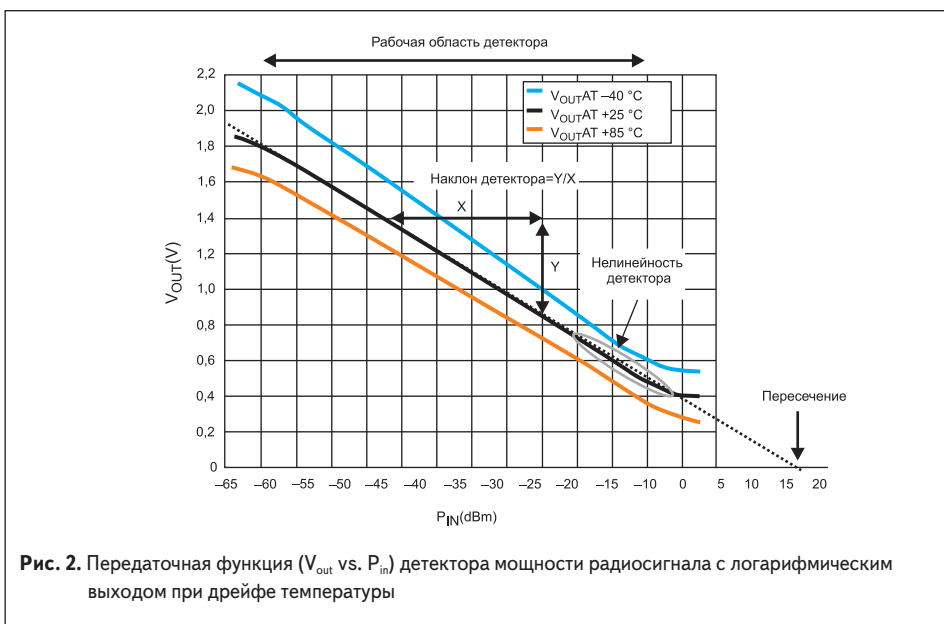


Таблица. Детекторы мощности радиосигнала со среднеквадратичным и не среднеквадратичным выходом

Устройство	Максимальная входная частота, ГГц	Динамический диапазон, дБ	Температурный дрейф, дБ	Корпус	Комментарий
AD8317	10	55	±0,5	2×3 мм 8-выводной LFCSP	Логарифмический детектор с не среднеквадратичным выходом
AD8318	8	70	±0,5	4×4 мм 16-выводной LFCSP	Логарифмический детектор с не среднеквадратичным выходом
AD8319	10	45	±0,5	2×3 мм 8-выводной LFCSP	Логарифмический детектор с не среднеквадратичным выходом
ADL5513	4	80	±0,5	3×3 мм 16-выводной LFCSP	Логарифмический детектор с не среднеквадратичным выходом
ADL5519	10	62	±0,5	5×5 мм 32-выводной LFCSP	Сдвоенный логарифмический детектор с не среднеквадратичным выходом
AD8361	2,5	30	±0,25	6-выводной SOT-23, 8-выводной MSOP	Линейный по V/V среднеквадратичный детектор
ADL5501	6	30	±0,1	2,1×2 мм 6-выводной SC-70	Линейный по V/V среднеквадратичный детектор
AD8362	3,8	65	±1,0	6,4×5 мм 16-выводной TSSOP	Логарифмический среднеквадратичный детектор
AD8363	6	50	±0,5	4×4 мм 16-выводной LFCSP	Логарифмический среднеквадратичный детектор
AD8364	2,7	60	±0,5	5×5 мм 32-выводной LFCSP	Сдвоенный логарифмический среднеквадратичный детектор

Калибровка петли управления мощностью радиосигнала

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма, который может быть использован для калибровки передатчика, аналогичного изображенному на рис. 1. Этот простой и быстрый двухточечный метод полезен, когда выходная мощность задана приблизительно (но измерять ее все равно надо точно). Для того чтобы такая калибровка была эффективной, встроенный приемник радиосигнала должен быть стабильным при изменении температуры и частоты, а также иметь предсказуемый отклик, который мог бы быть смоделирован простым уравнением.

Убедимся в том, что диапазон рабочих мощностей передатчика адекватно отображается на линейный участок характеристики при-

емника радиосигнала. Для начала убираем антенну и присоединяем к ее разъему внешний усилитель мощности. Затем устанавливаем уровень выходной мощности, близкий к максимальному. Значения, измеряемые на антенном гнезде измерителем мощности, передаются на встроенный микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор (DSP). Одновременно оцифрованные данные с приемника радиосигнала поступают в процессор передатчика.

Затем уменьшаем мощность до величины, близкой к минимальной, и повторяем процедуру (измеряем мощность на разъеме антенны и снимаем оцифрованные данные с приемника радиосигнала). По этим четырем показаниям (высокий и низкий уровень мощности, большее и меньшее значения с АЦП) могут быть

вычислены величины наклона (*Slope*) и точки пересечения (*Intercept*) с осью *x* (рис. 3), которые затем запоминаются в энергонезависимой памяти.

Реальная работа петли управления мощностью радиосигнала

На рис. 4 показана блок-схема процесса точной установки мощности передатчика после окончания калибровки. В этом примере целью является установка мощности с допуском ±0,5 дБ. Первоначальный уровень устанавливается, исходя из первого наилучшего прогноза. Затем считываются значения с АЦП детектора. Из памяти извлекаются значения *Intercept* и *Slope*, вычисляется значение выходной мощности. Если она не находится в пределах ±0,5 дБ от P_{SET} , то с помощью управляемого напряжением аттенюатора ее значение увеличивается или уменьшается примерно на 0,5 дБ. Слово «примерно» в данном случае применено потому, что переходная характеристика такого аттенюатора может быть нелинейной. Излучаемая мощность вновь измеряется, делается следующее изменение ее значения до тех пор, пока она не окажется в пределах требуемого допуска ±0,5 дБ. После того как это происходит, наблюдение за выходной мощностью продолжается, и при необходимости она подстраивается. Например, если изменение коэффициента передачи компонента цепи распространения сигнала с температурой привело к выходу мощности за пределы ±0,5 дБ, то активизируется петля обратной связи.

Существуют иные вариации этого алгоритма. Другой подход может быть применен в случае, если желательно держать выходную мощность на минимальном уровне, но с отклонением от установленного значения не более 0,5 дБ. При этом первоначально мощность устанавливается на уровень, лежащий ниже желаемого и выходящий за пределы допуска. Петля обратной связи замеряет значения мощности и при необходимости изменяет ее на значительно меньшую, чем в предыдущем случае, величину 0,1 дБ. Мощность в процессе приближения

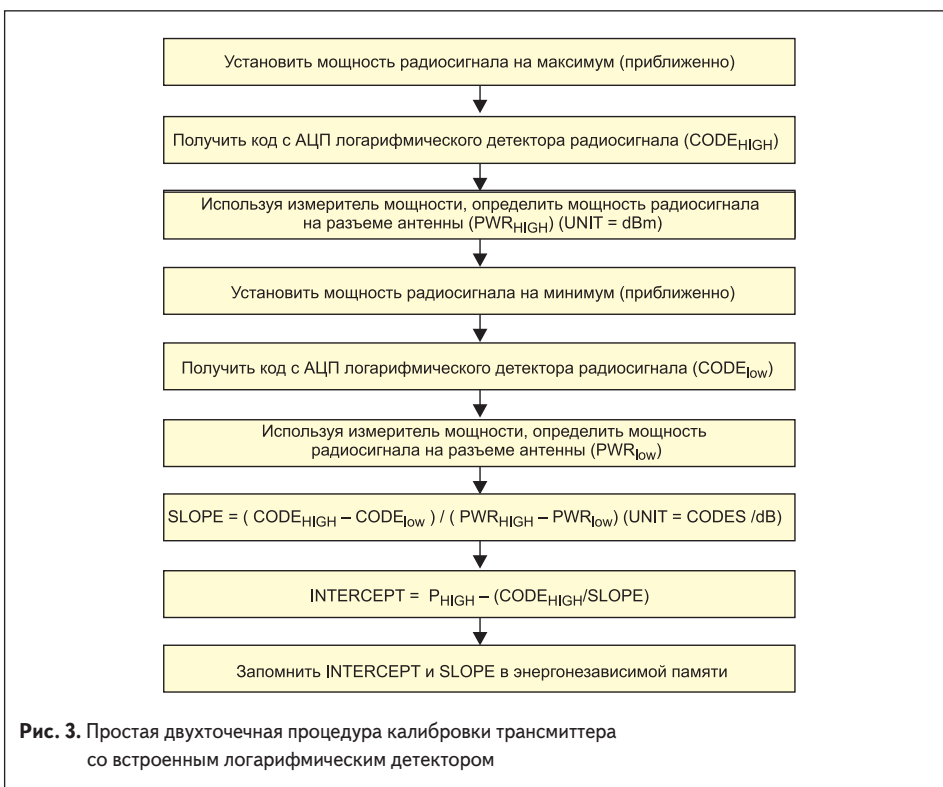


Рис. 3. Простая двухточечная процедура калибровки трансмиттера со встроенным логарифмическим детектором

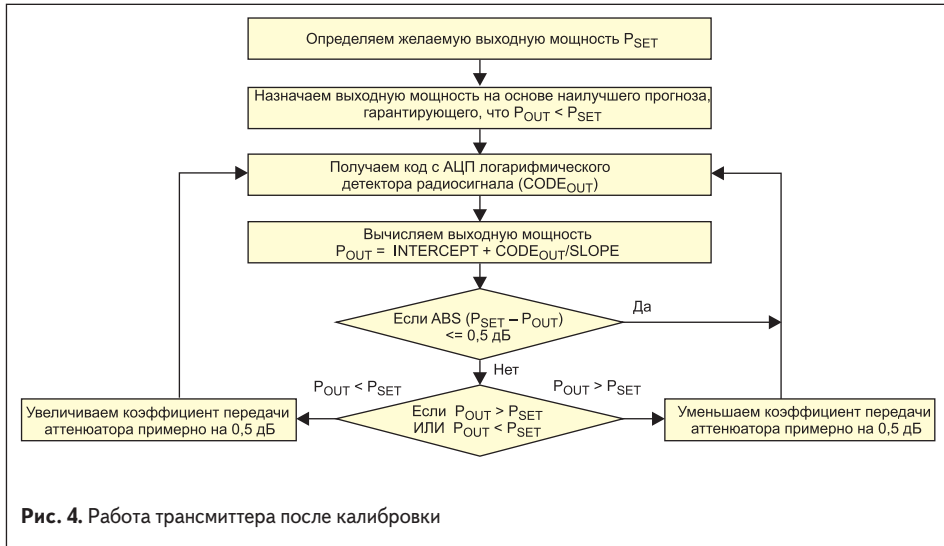


Рис. 4. Работа трансмиттера после калибровки

к заданному значению всегда остается меньше него. Как только она окажется внутри заданного интервала, процесс останавливается. Такой метод гарантирует, что реальная мощность сигнала в процессе приближения всегда будет оставаться меньше назначенной.

Ошибки после калибровки

На рисунках с пятого по восьмой показаны данные одного и того же приемника радиосигнала, но полученные разными путями с отличающимся числом точек калибровки. На рис. 5 можно видеть передаточную функцию детектора микросхемы AD8318 на 2,2 ГГц, логарифмического устройства с широким динамическим диапазоном, способного работать на частотах до 8 ГГц. В этом случае для калибровки используется двухточечная процедура с отсчетами на -12 и -52 дБм. По окончании калибровки может быть построен график остаточной ошибки измерения. Отметим, что ошибка не бывает нулевой даже при проведении калибровки при нормальных условиях окружающей среды. Это происходит вследствие того, что логарифмический усилитель

(log amp) даже в пределах своего рабочего диапазона не может вполне точно удовлетворять идеальной зависимости V_{OUT} от P_{IN} ($V_{OUT} = Slope \times (P_{IN} - Intercept)$). Ошибка же в точках -12 и -52 дБм равна нулю по определению.

На рис. 5 также приведены графики ошибок выходного напряжения при температурах -40 и +85 °C. Эти кривые были построены с использованием значений калибровочных коэффициентов *Slope* и *Intercept*, определенных при +25 °C. Несмотря на слабый остаточный температурный дрейф, пока не применяется программа калибровки, учитывающая температуру, нужно использовать коэффициенты, полученные при +25 °C.

Во многих случаях, когда УМ работает на максимуме, желательно иметь более высокую точность. Это имеет смысл со многих точек зрения. Например, могут существовать требования регулирующих органов, устанавливающие более высокую точность при работе на номинальных (rated) или максимальных уровнях мощности. Однако, с точки зрения перспектив создания систем, можно зрительно выигрывать в более высокой точности и при номинальных

режимах. Рассмотрим передатчик, рассчитанный на излучение 45 дБм (примерно 30 Вт). Если калибровка может дать наилучшую точность ±2 дБм, то схемотехнику УМ (мощный транзистор и теплоотвод) надо создавать с расчетом на надежное излучение 47 дБм, или 50 Вт. Это приведет к потерям свободного пространства и денег. Систему же, где точность после калибровки составляет ±0,5 дБм, можно создавать, рассчитывая на надежное излучение 45,5 дБм, или примерно 36 Вт.

В некоторых случаях на достижимую точность можно значительно влиять, выбирая различные точки калибровки. На рис. 7 показаны те же измеренные данные, что и на рис. 5, но калибровочные точки выбраны другие. Заметьте, насколько велика точность на этом рисунке (±0,25 дБм в диапазоне от -10 до -30 дБм). Однако она значительно снижается при низких уровнях мощности, находящихся далеко от точек калибровки.

На рис. 6 показано, как ценой линейности, перемещая калибровочные точки, можно расширить динамический диапазон. В данном случае точки выбраны на уровнях -4 и -60 дБм. Они находятся на концах линейного диапазона устройства. Вновь можно видеть ошибку в 0 дБ при +25 °C, а также то, что диапазон микросхемы AD8318, в котором обеспечивается точность ±1 дБ, расширяется до 60 дБ при +25 °C и до 58 дБ с повышением температуры. Недостатком этого метода является рост общей ошибки, особенно у верхнего конца диапазона приемника.

На рис. 8 показана посткалибровочная ошибка, которая получается при применении более аккуратного многоточечного алгоритма. В этом случае на трансмиттере с шагом 6 дБм устанавливаются несколько значений выходной мощности и измеряются выходные напряжения детекторов. Эти величины используются для разбиения передаточной характеристики на сегменты, каждый из которых имеет свое значение *Slope* и *Intercept*. Этот алгоритм направлен на весьма значительное снижение ошибки, происходящей от нелинейности детектора.

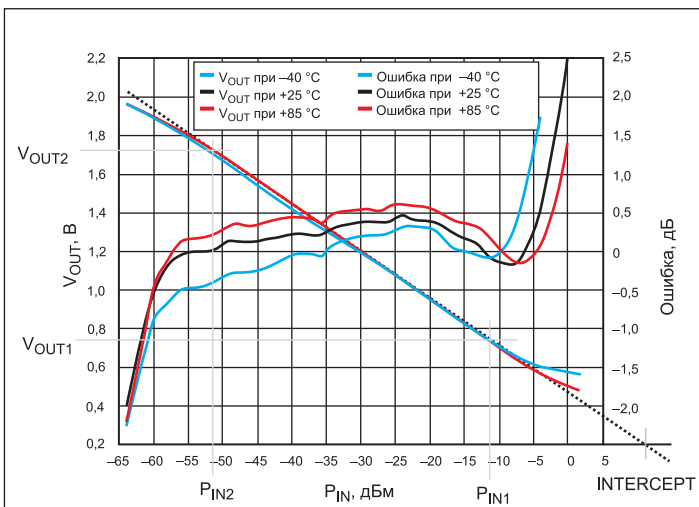


Рис. 5. Двухточечная калибровка с отсчетами внутри линейного рабочего диапазона детектора с хорошими суммарными характеристиками

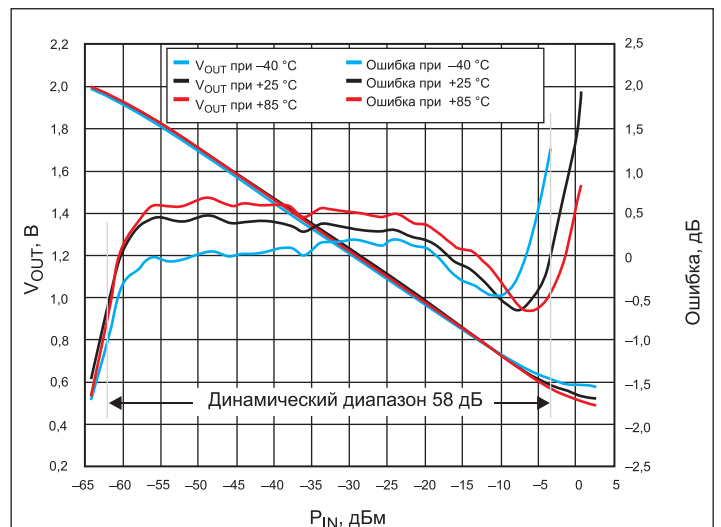
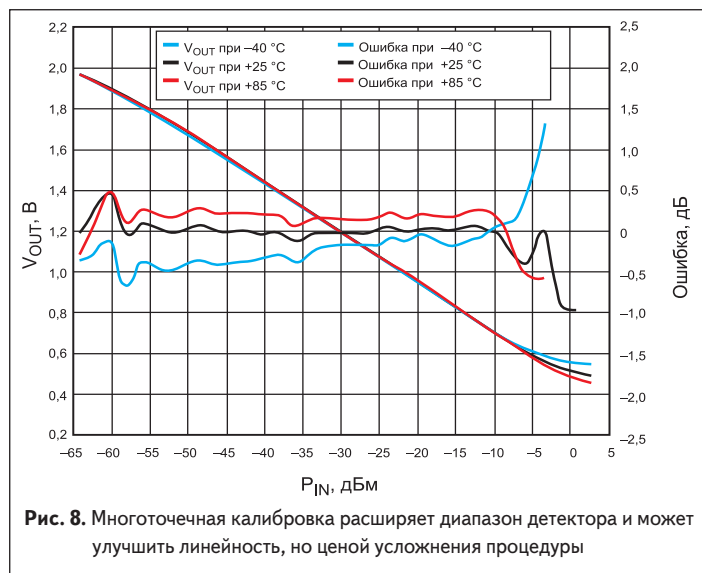
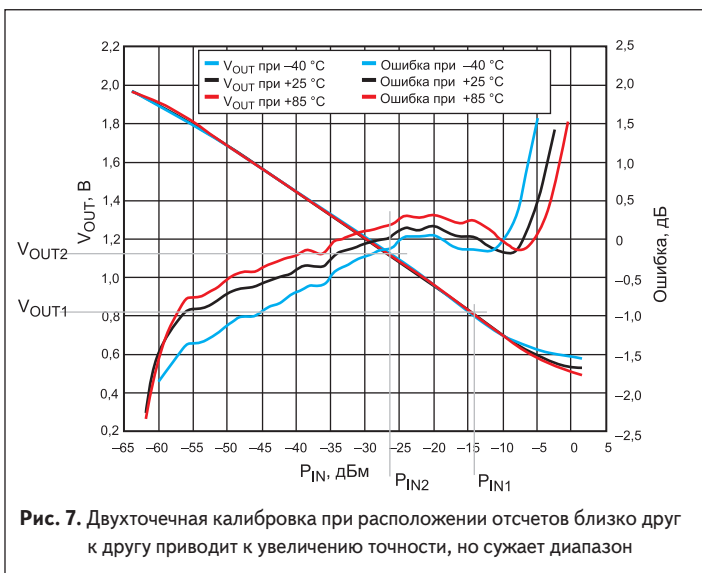


Рис. 6. Перемещение точек калибровки вовне и внутрь менее линейного рабочего участка увеличивает рабочий диапазон, но ценой меньшей точности



Основным источником погрешности при этом остается только температурный дрейф. Недостаток этого метода заключается в большем времени, затрачиваемом на процедуру, и увеличении объема памяти, требуемой для хранения многочисленных калибровочных коэффициентов *Slope* и *Intercept*.

Рис. 8 иллюстрирует интересную разницу в поведении детектора мощности у нижнего и верхнего концов его динамического диапазона. Хотя многоточечный алгоритм сдвигает верхний конец динамического диапазона, это расширение не является очень полезным из-за большого температурного дрейфа. Заметьте, как кривые, соответствующие нормальной,

высокой и низкой температурам, расходятся при значениях выше -10 дБм. Более полезен результат при низких значениях мощностей. Кроме того, многоточечный алгоритм помогает сдвинуть и нижнюю границу динамического диапазона.

Однако в этом случае кривые, соответствующие высокой и низкой температурам, плотно отслеживают поведение кривой, снятой при нормальных условиях, даже в области нелинейности. Поэтому если нейтрализовать нелинейность, используя многоточечный алгоритм, то такая калибровка будет поддерживать очень хорошие результаты при изменении температуры. Данный подход с пользой рас-

ширяет передаточную функцию микросхемы AD8318 вниз вплоть до -65 дБм.

Заключение

Различные системы калибровки необходимы, когда требуется излучать радиосигнал, точно поддерживая значение мощности. Современные детекторы мощности радиосигнала, расположенные внутри интегральных схем, имеют линейный отклик и стабильны по частоте и температуре. Это может значительно упростить процедуру калибровки и обеспечить точность системы, превышающую $\pm 0,5$ дБ. Расположение и число точек калибровки существенно влияет на точность, достижимую после нее. ■