

Оптимізація налаштувань для підвищення чутливості аналізатора спектра

Підвищення чутливості вимірювань спектра є ключем до вимірювання низькорівневих сигналів

Переклад: Вадим Потапенко

Редагування: Віктор Бутирін, директор, Юнітест

E-mail: Victor_Butyryn@unitest.com

Аналізатори сигналів (також відомі як аналізатори спектра) широко використовуються для вимірювання як відомих, так і невідомих низькорівневих сигналів. Використання корекції шуму, зменшення рівня власних шумів (Noise Floor Extension, NFE) та оптимізація налаштувань аналізатора дають змогу досягти максимальної чутливості приладу, що полегшує виявлення та вимірювання низькорівневих сигналів.

Чутливість аналізаторів сигналів зазвичай вказується в їхніх технічних характеристиках і часто представлена у вигляді середнього рівня шуму (*Displayed Average Noise Level, DANL*) або коефіцієнта шуму (*Noise Figure, NF*). DANL, що виражений в дБм/Гц та визначається як амплітуда рівня власних шумів аналізатора сигналів у смузі розрешення (*Resolution Bandwidth, RBW*) 1 Герц у заданому діапазоні частот за умови 50-омного навантаження і вхідного ослаблення 0 дБ. Як правило, будь-яке усереднення, що застосовується до сигналу, виконується в логарифмічному масштабі, що знижує рівень власних шумів на 2.5 дБ; це зниження є основною відмінністю між DANL і NF.

Рівень власних шумів аналізатора сигналів складається з двох компонентів: коефіцієнта шуму, що позначається як NFSA (*Noise Figure of the Signal Analyzer*), і енергії теплового шуму.

Амплітуду енергії теплового шуму визначають за того самого навантаження на вході аналізатора сигналів, що й для DANL. Ця амплітуда часто виражається формулою kTB , де три параметри визначаються таким чином:

- k = постійна Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К);
- T = температура навколишнього середовища (у градусах Кельвіна);
- B = смуга пропускання, в якій вимірюється шум (Гц);
- -2.51 дБ = поправка на занижений відгук при використанні логарифмічного усереднення відеосигналу;

- 0.24 дБ = поправка на шумову смугу частот фільтрів RBW в аналізаторах сигналів серії X порівняно з номінальною смугою частот RBW.

Як правило, смуга пропускання нормалізується до смуги пропускання 1 Гц, у результаті чого вираз $10 \times \log(kTB)$ дорівнює -173.98 дБм/Гц за кімнатної температури. Тоді DANL у смузі пропускання 1 Гц визначається таким чином:

$$\text{DANL} = -173.98 \text{ дБм/Гц} + \text{NFSA} - 2.51 \text{ дБ} + 0.24 \text{ дБ} \quad (1)$$

Що може бути переписано як:

$$\text{NFSA} = \text{DANL} + 176.25 \text{ дБ/Гц} \quad (2)$$

Примітка. Якщо у специфікації DANL замість логарифмічного усереднення відеосигналу використовується усереднення за середньоквадратичним значенням (СКЗ), поправка 2.51 дБ може бути виключена з розрахунків. Наприклад: значення DANL -151 дБм/Гц відповідає значенню NFSA 25.25 (дБ).

НАЛАШТУВАННЯ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЧУТЛИВІСТЬ

Правильно відкалібрований аналізатор сигналів — це той, який точно відображає сигнал, поданий на вхідний порт, повинен мати коефіцієнт підсилення, що дорівнює одиниці. Простіше кажучи, будь-який сигнал, поданий на вхідний порт, наприклад сигнал 0 дБм, повинен вимірюватися і відображатися з рівнем 0 дБм плюс-мінус похибка аналізатора. Однак регулювання ослаблення або підсилення впливає на цю залежність.

Збільшення вхідного ослаблення призводить до відповідного збільшення підсилення в каскаді смуг розрешення аналізатора сигналів. Ця компенсація допомагає підтримувати відкалібрований рівень, або постійне співвідношення сигнал/шум, на дисплеї завдяки підвищенню рівня власних шумів. Використання зовнішнього ослаблення призведе до аналогічного результату. Наведена нижче формула показує, як рівень власних шумів (*Noise Floor*) аналізатора сигналів залежить від ослаблення (*Attenuation*) і смуги розрешення.

Рівняння містить у собі член « $10 \times \log(\text{RBW})$ », який компенсує RBW, що перевищують 1 Гц:

$$\text{Noise Floor} = \text{DANL} + \text{Attenuation} + 10 \times \log(\text{RBW}). \quad (3)$$

Рівняння 3 визначає залежність, яку можна використовувати для покращення рівня власних шумів. У багатьох випадках існує додаткова специфікація DANL, що застосовується при використанні внутрішнього попереднього підсилення. Однак при використанні зовнішнього передпідсилювача модифікований DANL можна визначити за допомогою наступного рівняння, отриманого з формули каскадного коефіцієнта шуму за умови, що коефіцієнт підсилення аналізатора сигналів дорівнює одиниці. При розгляді комбінації передпідсилювача та аналізатора сигналів коефіцієнт шуму системи розраховується як:

$$NF_{\text{системи}} = NF_{\text{передпідсилювача}} + [(NFSA - 1)/G_{\text{передпідсилювача}}]. \quad (4)$$

Приклад

Використовуючи попередній приклад, де NFSA = 25.25 дБ, розглянемо передпідсилювач із коефіцієнтом підсилення 20 дБ і коефіцієнтом шуму 5 дБ. Перетворення цих значень у відношення потужностей і підстановка їх у рівняння 4 має такий вигляд:

Крок 1. Перетворення логарифмічних значень у лінійні:

$$NF_{\text{лінійн.}} = 10^{25.25/10} = 334.97,$$

$$G_{\text{передпідсилювача}} = 10^{20/10} = 100,$$

$$NF_{\text{передпідсилювача}} = 10^{5/10} = 3.16.$$

Крок 2. Підстановка лінійних значень у рівняння 4:

$$NF_{\text{системи}} = 3.16 + [(334.97 - 1)/100].$$

Крок 3. Знаходження логарифмічного значення:

$$NF_{\text{системи}} = 10 \times \log [3.16 + (334.97/100)] = 8.14 \text{ дБ}.$$

Потім це значення можна підставити в рівняння 1 як NFSA і визначити новий DANL із зовнішнім попереднім підсиленням.

У цьому прикладі DANL покращується з -151 дБм/Гц до -168 дБм/Гц:

$$\text{DANL} = -174(\text{дБм/Гц}) + 8.14(\text{дБ}) - 2.51(\text{дБ}) = -168.37 \text{ (дБм/Гц)}.$$

Як бачимо з прикладу, використання зовнішнього передпідсилювача може значно знизити рівень власних шумів. Однак це зниження має свої недоліки. Зовнішній передпідсилювач може вносити нелінійні спотворення в систему, що потенційно обмежує здатність аналізатора сигналів точно вимірювати сильні сигнали. Найкращим рішенням є використання внутрішнього передпідсилювача, який можна вмикати і вимикати залежно від вимог до вимірювань. Така гнучкість особливо корисна в контексті автоматизованого тестування.

У цьому розділі ми розглянули, як зміни налаштувань ослаблення, смуги розрішення і попереднього підсилення можуть підвищити чутливість аналізатора сигналів. Більшість сучасних аналізаторів також оснащені функціями вимірювання рівня власних шумів та їхньої автоматичної компенсації в результатах вимірювання сигналу, що ми розглянемо далі.

ВНЕСЕННЯ ПОПРАВОК НА РІВЕНЬ ШУМУ

Під час вимірювання випробовуваних пристроїв (ВП) за допомогою аналізатора сигналів результуючий спектр,

що відображається на екрані аналізатора, є комбінацією вхідного сигналу (ВП), теплового шуму і коефіцієнта шуму аналізатора сигналів. Якщо ВП від'єднано від входу і замінено на 50-омне навантаження, то на екрані відображається тільки тепловий шум і NFSA, які визначають рівень власних шумів аналізатора.

З розвитком технологій аналізаторів сигналів цей рівень власних шумів може бути точно вимірний (з великим усередненням) і збережений у файлі під назвою Correction Trace. Коли вхідний сигнал ВП під'єднано і виміряно, отримана траса зберігається у файл під назвою Measurement Trace. Основний метод корекції шуму, розглянутий тут, передбачає отримання результуючої траси (Resultant Trace), яка є спектром вхідного сигналу ВП з видаленим надлишковим шумом. Результуюча траса розраховується за допомогою рівнянь 5 і 6:

$$\text{Resultant Trace} = \text{Measurement Trace} - \text{Correction Trace}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Resultant Trace} &= (\text{ВП}_{\text{вх. сигнал}} + \text{kTB} + \text{NFSA}) - \\ &- (\text{kTB} + \text{NFSA}) = \text{ВП}_{\text{вх. сигнал}} \end{aligned} \quad (6)$$

Зверніть увагу, що перед відніманням усі значення мають бути перетворені з логарифмічних (дБм) на лінійні в міліваттах (мВт). Потім результуюча траса перетворюється назад у дБм і виводиться на екран аналізатора сигналів. Цей процес має дві основні переваги:

- покращує видимість низькорівневих сигналів;
- дає змогу проводити точніші вимірювання амплітуди завдяки усуненню похибок, внесених власними шумами аналізатора сигналів.

На рисунку 1 показано відносно простий метод корекції шумів за допомогою математичних операцій з трасами. Спочатку виконується усереднення власних шумів аналізатора сигналів з 50-омним навантаженням на вході, і ці дані зберігаються як траса 1 (жовта). Потім підключається ВП, його сигнал реєструється і зберігається як траса 2 (синя). Нарешті, застосовується математична операція віднімання потужності цих двох трас, і результат зберігається як траса 3 (фіолетова). Корекція шумів найбільш ефективна, коли вхідний сигнал близький до рівня власних шумів аналізатора сигналів. Корекція практично не впливає на сильні сигнали, оскільки вони роблять набагато менший внесок у рівень шуму.

Основним недоліком цього методу є те, що під час зміни налаштувань необхідно вимикати ВП і підключати 50-омне навантаження. Альтернативний метод отримання коригуючої траси (Correction Trace) без від'єднання ВП полягає у збільшенні вхідного ослаблення (наприклад, до 70 дБ), щоб підняти рівень власних шумів аналізатора сигналів набагато вище за вхідний сигнал ВП, а потім зберегти його у вигляді коригуючої траси. Тепер коригуюча траса міститиме компоненти, показані в рівнянні:

$$\text{Correction Trace} = \text{ВП}_{\text{вх. сигнал}} + \text{kTB} + \text{NFSA} + \text{Ослаблення}. \quad (7)$$

Якщо $\text{kTB} + \text{NFSA} + \text{Ослаблення} \gg \text{ВП}_{\text{вх. сигнал}}$, то можна не вказувати рівень вхідного сигналу ВП і визначити коригуючу трасу відповідно до наступного рівняння:

$$\text{Correction Trace} = \text{kTB} + \text{NFSA} + \text{Ослаблення}. \quad (8)$$

Віднімаючи відоме значення ослаблення з рівняння 8, можна отримати вихідну коригуючу трасу, що використовується в ручному методі, яка представлена в наступному рівнянні:

$$\text{Correction Trace} = \text{kTB} + \text{NFSA} \quad (9)$$

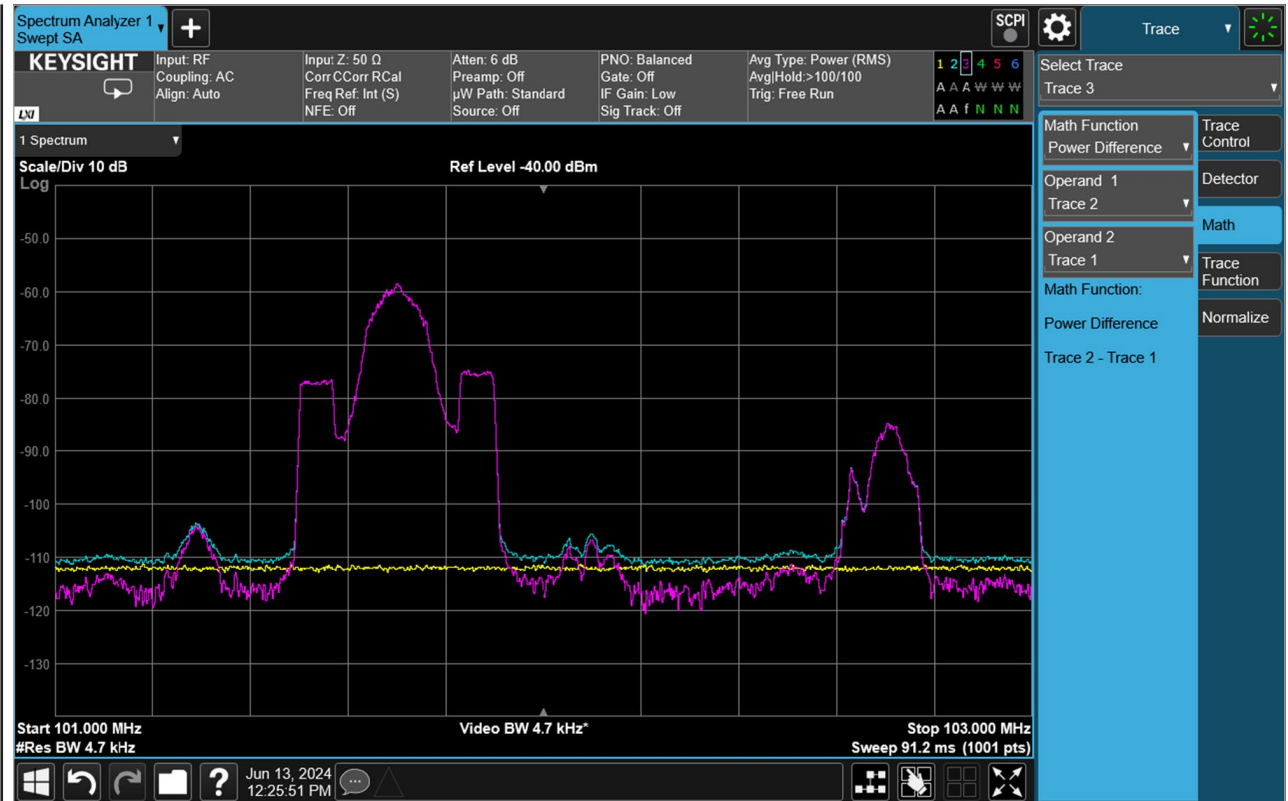


Рис. 1. Метод корекції шумів за допомогою математичних операцій з трасами

Ключовим обмеженням цього процесу є те, що коригуюча траса дійсна тільки для поточних налаштувань аналізатора сигналів. Зміна таких налаштувань, як центральна частота,

смуга огляду і смуга розрешення (RBW), зробіть недійсними значення, збережені в коригуючій трасі. Надійніший підхід передбачає знання конкретних значень NFSA у всіх частот-

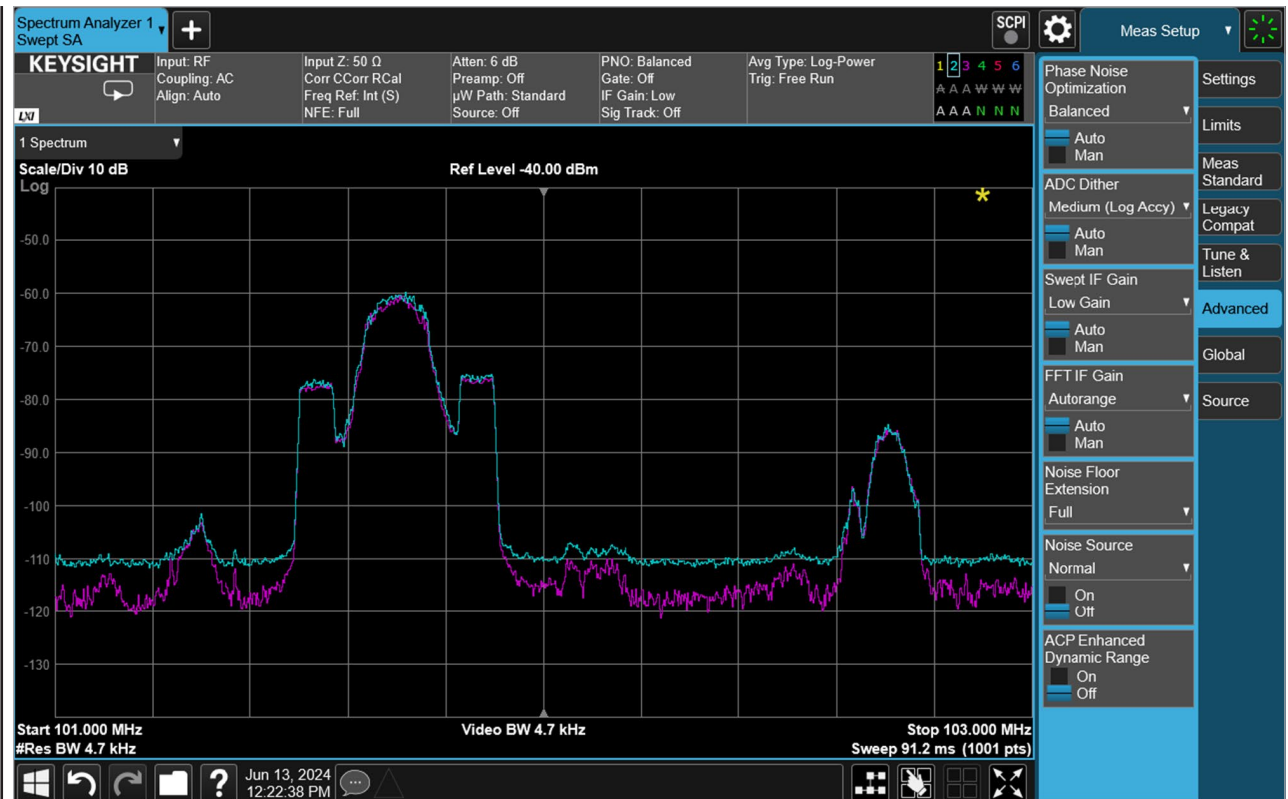


Рис. 2. Використання функції Noise Floor Extension (NFE) в аналізаторі сигналів Keysight N9040B UXA

них точках, що дає змогу застосувати коригуючу трасу для будь-яких налаштувань аналізатора.

В аналізаторах сигналів серії X компанії Keysight Technologies використовується удосконалена корекція під назвою Characterize Noise Floor для вимірювання та збереження залишкового рівня власних шумів у діапазоні частот аналізатора та в різних атенуаторах і трактах сигналу в рамках функції Noise Floor Extension (NFE) (рис. 2). Використання функції NFE в аналізаторі сигналів Keysight N9040B UXA допомагає покращити чутливість до низькорівневих сигналів. Синя траса — відгук аналізатора без використання функції NFE. Фіолетова траса — той самий сигнал після перемикання функції NFE з режиму Off (вимкнено) в режим Full (повний).

У наведеному прикладі після перемикання функції NFE в режим Full рівень власних шумів знижується приблизно на 10 дБм.

Дані зберігаються в пам'яті приладу. Коли користувач вмикає функцію NFE на аналізаторі, аналізатор розраховує коригуючу трасу на основі поточних налаштувань приладу і збережених значень коефіцієнта шуму. Це усуває необхідність вимірювання рівня власних шумів аналізатора, як це робилося в ручному режимі. Крім того, це також значно спрощує використання корекції рівня шуму та заощаджує час, усуваючи необхідність вимірювання рівня власних шумів приладу при кожній зміні налаштувань.

Для ефективної роботи функції NFE важливо використовувати достатню кількість усереднень траси. Рекомендується використовувати не менше 10 усереднень траси.

КОРОТКЕ КЕРІВНИЦТВО ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ФУНКЦІЇ NFE

У наведеному сценарії виявлено основний сигнал на частоті 1 ГГц, а також два слабші сигнали по обидва боки від нього. Підвищення відношення сигнал/шум (SNR) може зробити ці слабкі сигнали більш помітними.

Один зі швидких способів підвищити SNR — знизити рівень шуму. Швидкий спосіб знизити рівень власних шумів — використовувати функцію NFE. Почніть з натискання третього заголовка меню на панелі вимірювань у верхній частині екрана (рис. 3).

Потім натисніть функціональну клавішу *Noise Floor Extension* і виберіть *Adaptive* або *Full*. Крім того, увімкніть усереднення траси з достатньою кількістю усереднень (≥ 10 усереднень) (рис. 4).

Синя траса на рисунку 5 — це вимірювання того самого сигналу, але з увімкненим режимом NFE Adaptive. Рівень власних шумів зменшився приблизно на 5 дБ, що полегшує ідентифікацію слабких сигналів (рис. 5).

На рисунку 6 показано корекцію Characterize Noise Floor, яку можна відкрити, натиснувши *System Settings* → *Alignments* → *Advanced* → *Characterize Noise Floor*. Для досягнення найкращих результатів перед використанням функції NFE може знадобитися виміряти рівень власних шумів. Аналізатор буде автоматично сповіщати користувача про необхідність щорічного виконання цієї корекції, однак за бажання користувач може виконувати її частіше для підтримання максимальних характеристик приладу.



Рис. 3. Рисунок 3. Початок використання функції NFE: натисніть на третій заголовок меню на панелі вимірювань у верхній частині екрана



Рис. 4. Натисніть функціональну клавішу Noise Floor Extension і виберіть Adaptive або Full. Крім того, увімкніть усереднення траси з достатньою кількістю усереднень (≥ 10 усереднень)

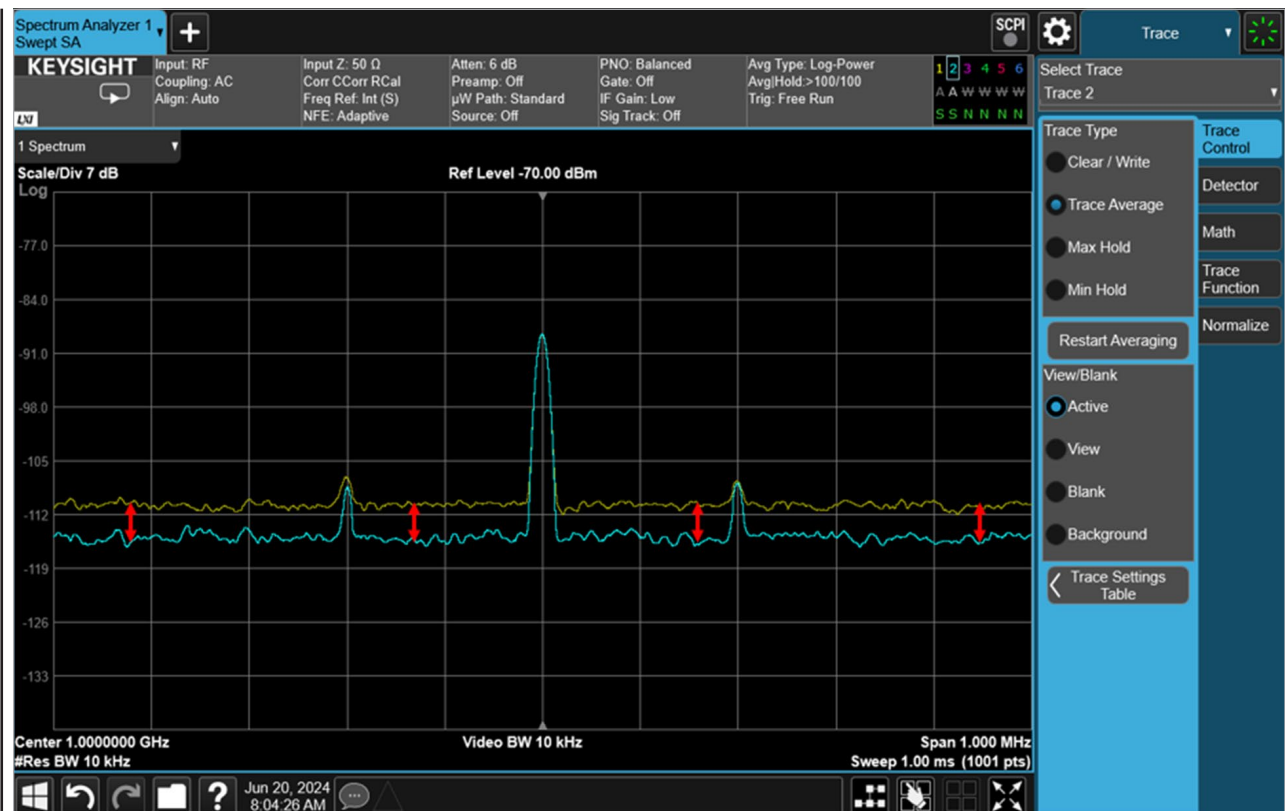


Рис. 5. Вимірювання того самого сигналу, але з увімкненим режимом NFE Adaptive

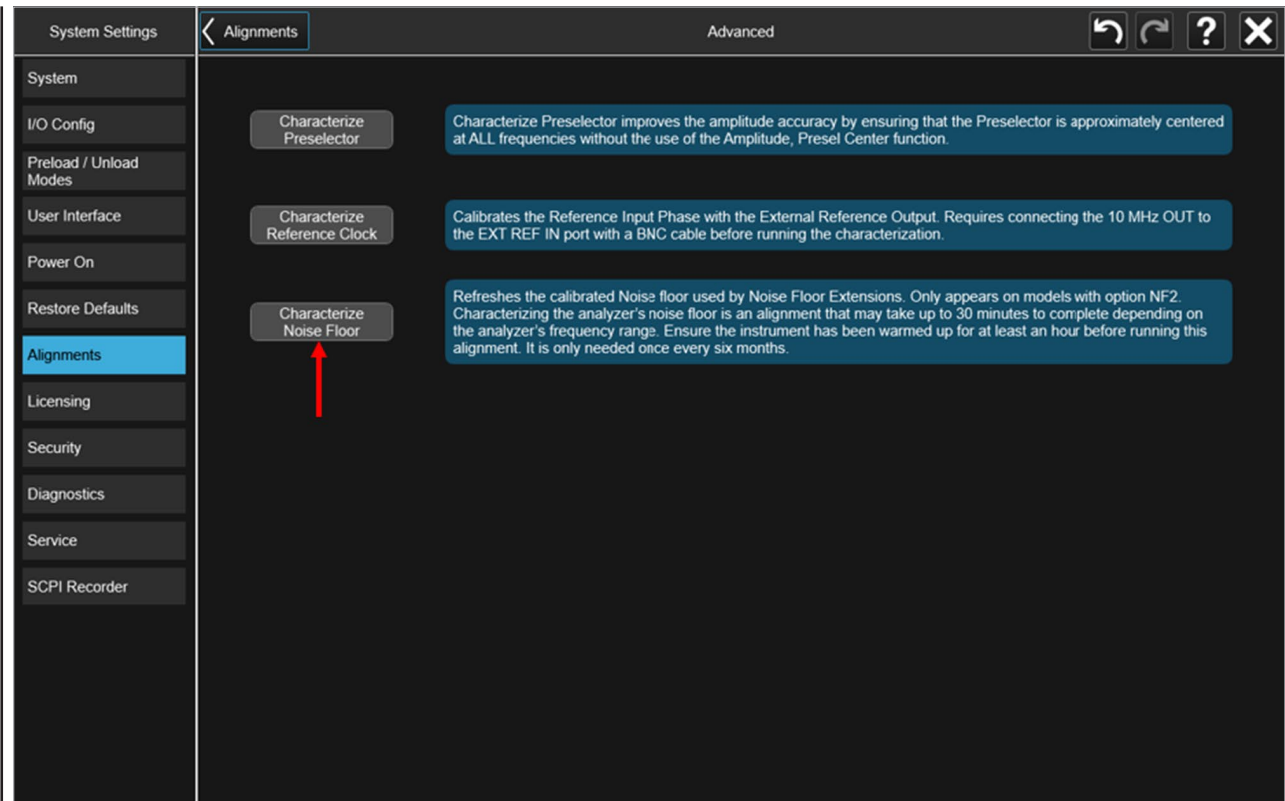


Рис. 5. Вимірювання того самого сигналу, але з увімкненим режимом NFE Adaptive

КОРЕКЦІЯ РІВНЯ ШУМУ В ІНШИХ ВИМІРЮВАННЯХ

Функції корекції шумів включені в різні інші програми для вимірювань в аналізаторах серії X. Вимірювання за допомогою програми Power Suite в аналізаторах спектра, такі як вимірювання потужності в сусідньому каналі (*Adjacent Carrier Power, ACP*), містять корекцію шумів з моменту появи аналізаторів сигналів серії X. Аналогічно, інші вимірювальні функції, такі як Fast Power (FP2), також використовують корекцію шумів. Крім того, за багаторазового вимірювання відомого повторюваного цифрового сигналу можна математично зменшити мінімальний рівень корельованих шумів.

ВИСНОВОК

У кожному з розглянутих методів корекції шуму віднімаються як тепловий шум (кТВ), так і коефіцієнт шуму аналізатора сигналів. Таке віднімання підвищує чутливість аналізатора, даючи йому змогу виявляти і вимірювати низькорівневі сигнали, які в іншому разі можуть бути перекриті мінімальним рівнем шуму. Однак, хоча ці методи можуть бути ефективними в багатьох ситуаціях, вони не є універсальними. Проблеми виникають, коли вимірювані значення близькі або дорівнюють рівню власних шумів приладу. Фактично, якщо вони рівні, то теоретично результат дорівнюватиме від'ємній нескінченності в дБ. Практична реалізація корекції шуму зазвичай містить порогове значення або градуїований рівень віднімання, близький до рівня власних шумів приладу. Також не забувайте використовувати достатнє усереднення при застосуванні функції NFE, щоб зменшити випадкові коливання в скоригованому рівні власних шумів.

У цій статті розглянуто різні методи вимірювання низькорівневих сигналів за допомогою аналізатора сигналів. Важливо розуміти, що на чутливість впливають такі чинники, як смуга розрешення, вхідне ослаблення і використання передпідсилювача. Для подальшого підвищення чутливості приладу можна застосовувати методи подавлення шуму, такі як корекція шумів і зниження рівня власних шумів. Крім того, необхідно мінімізувати втрати в зовнішніх колах, що ведуть до аналізатора сигналів, оскільки вони можуть ще більше знизити загальну чутливість.

Основний перелік контрольно-вимірювального обладнання, яке пропонує компанія Keysight Technologies, містить:

- прилади загального призначення (осцилографи, електронні лічильники, вимірювальні пристрої, генератори функцій, синтезатори сигналів, джерела живлення);
- радіовимірювальні прилади;
- контрольно-вимірювальне обладнання для телекомунікацій;
- устаткування для тестування бездротового зв'язку;
- вимірювальні стенди;
- оптичні прилади;
- техніка для налагодження цифрових пристроїв;
- техніка для тестування електронних компонентів.

Розширте межі своїх технічних можливостей разом із Keysight Technologies!

Більш детальну інформацію щодо продукції компанії Keysight Technologies можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора в Україні — компанії Юнітест:

**04053, м. Київ, вул. Олеса Гончара, 6,
тел. +38 (044) 272-60-94,
e-mail: web@unitest.com,
www.unitest.com**