

Інтерпретація та застосування поняття ймовірності перехоплення при спектральному аналізі в реальному часі

Переклад та редагування: Віктор Бутирін, директор, Юнітест
E-mail: Victor_Butyryn@unitest.com

Ця стаття описує вплив і взаємодію ключових факторів, що визначають значення ймовірності перехоплення (*Probability of Intercept, POI*) і відносну амплітуду при спектральному аналізі в реальному часі в аналізаторах сигналів Keysight серії X, що допоможе вам зрозуміти, якого мінімального значення POI ви можете досягти у вашому конкретному застосуванні.

ВСТУП

Так як сучасні бездротові сигнали стають дедалі складнішими, процес аналізу та інтерпретації цих сигналів також ускладнюється. Прикладами складних сигналів є сигнали з певною комбінацією носійних частот, що динамічно змінюються, цифрової модуляції, мультиплексування з часовим поділом та імпульсних сигналів. Крім того, все більше пристроїв і систем використовують одні й ті ж частотні діапазони; в результаті стає все важче ідентифікувати і характеризувати завади і помилки сигналу, особливо коли вони виникають в перехідних сигналах.

Під час відстеження неявного сигналу важливими є кілька характеристик: коли він виникає, як довго триває, де він знаходиться в спектрі, і наскільки він великий чи малий. Для визначення цих характеристик потрібен аналізатор сигналів, здатний виконувати спектральний аналіз в реальному часі (*real-time spectrum analysis, RTSA*), збирати дані в реальному часі або робити і те, і інше. Аналіз спектра в реальному часі має вирішальне значення для виявлення, моніторингу та ідентифікації пере-

хідних сигналів, в той час як збір даних в реальному часі дозволяє проводити детальний аналіз після обробки, в тому числі демодуляцію. Аналізатори сигналів Keysight Technologies, Inc., оснащені RTSA, включають аналізатори N9020B і N9021B MXA; приймач електромагнітних завад N9038B MXE; аналізатори N9030B і N9032B PXA; а також аналізатори N9040B, N9041B і N9042B UXA.

Основне питання в RTSA є: «Які сигнали я можу бачити?». Ключовою характеристикою є ймовірність перехоплення, яка є статистичною величиною. У специфікаціях аналізаторів сигналів POI часто визначається як мінімальна тривалість часу, необхідна для того, щоб сигнал можна було спостерігати — і точно виміряти — безперервно зі 100-відсотковою ймовірністю, за умови, що цей сигнал на певну величину перевищує рівень шуму приладу. Як приклад, Keysight Technologies, Inc. N9032B PXA або N9042B UXA серії X, оснащені смугою аналізу 2 ГГц і можливістю аналізу спектра в реальному часі (обидві опції залежать від моделі), можуть виявляти сигнал тривалістю 227 нс у стовідсоткових випадках. Крім того, існує 100-від-

соткова ймовірність виявлення сигналів тривалістю 1 мкс зі збереженням повної амплітудної точності.

В аналізаторах сигналів Keysight серії X значення POI і відносну амплітуду визначають шість основних факторів: частота дискретизації, тривалість запису або розмір ШПФ (швидке перетворення Фур'є, *Fast Fourier Transform*), функція вікна, розмір вікна, обробка перекриття ШПФ і рівень шуму. Оскільки багато з цих параметрів користувач може регулювати самостійно, то ваш вибір впливатиме на мінімально досяжне значення POI. Ця стаття описує вплив і взаємодію ключових факторів, що допоможе вам зрозуміти, якого мінімального значення POI ви можете досягти у вашому конкретному застосуванні.

ВІДСТЕЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ АБО ПЕРЕХІДНИХ СИГНАЛІВ

В умовах комерційного або військового використання завади можуть бути навмисними або ненавмисними, а «сигнал-порушник» — відомим або невідомим. У будь-якому випадку, швидкоплинні або нечіткі завади, які виникають нечасто — переривчасте, помилкове випромінювання — найважче побачити, зафіксувати й оцінити. Ця стаття присвячена сигналам завад, а не поведінці сигналів (наприклад, сигналам, що тимчасово перебувають на неправильних частотах), оскільки ці поняття і методи схожі, і саме виявлення завад є більш поширеним завданням.

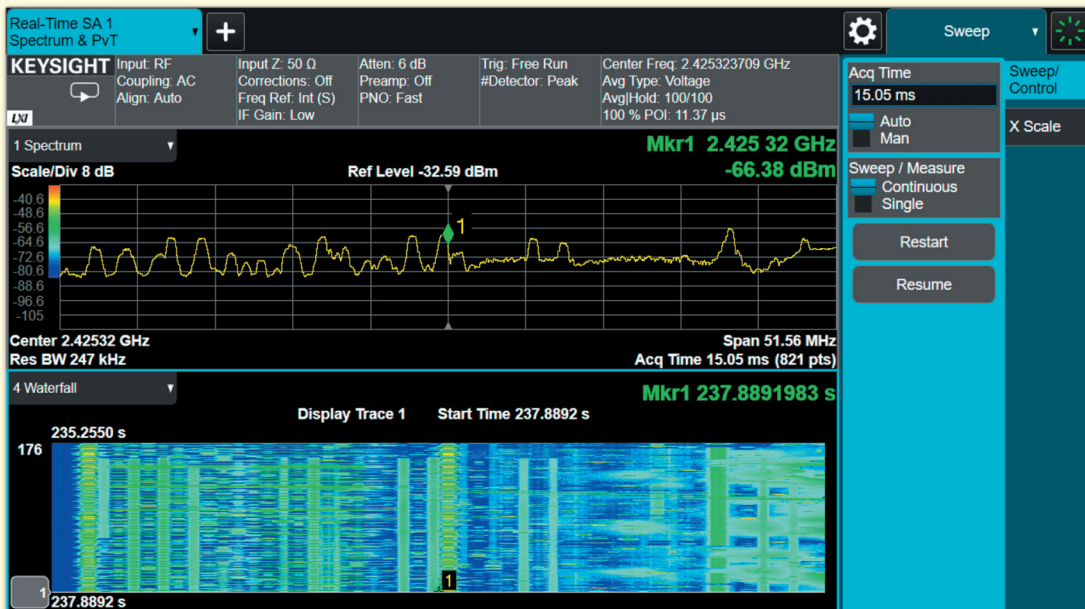


Рис. 1. Спектрограма в реальному часі (внизу) надає інформацію про час, частоту та амплітуду. Єдиний об'єднаний спектр (вгорі) включає в себе визначену користувачем кількість спектрів, представлених у традиційному вигляді спектра

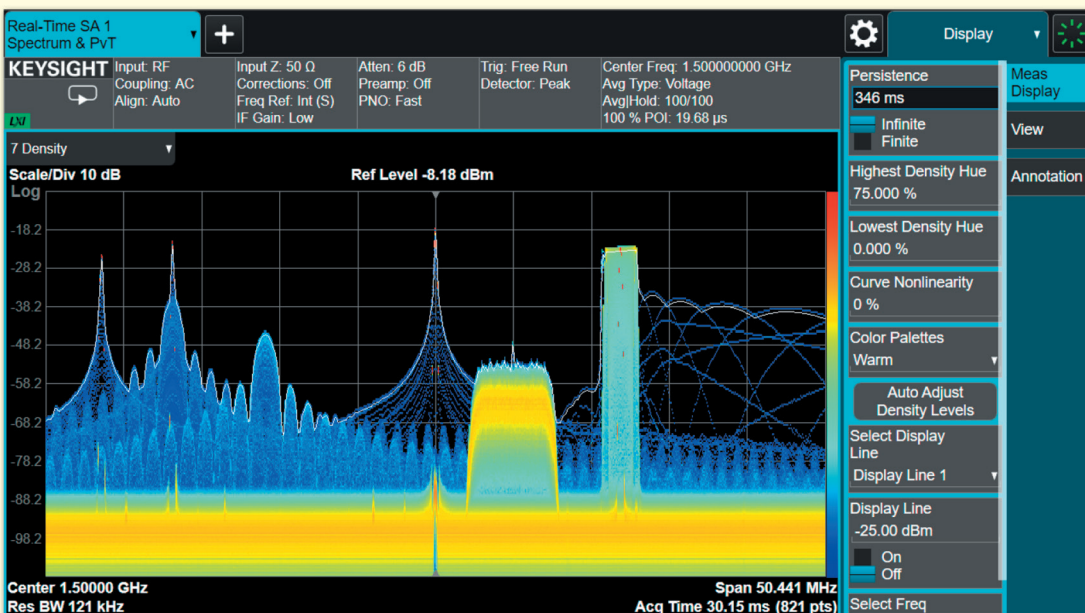


Рис. 2. Відображення густини в реальному часі дає детальне уявлення про поточні зміни у спектральному середовищі. Як показано на кольоровій шкалі (права частина графіка), теплі кольори вказують на часту появу, а холодні — на нечасту

Залежно від природи сигналів, пошук може відбуватися в часовій або частотній області. Часова область найкраще підходить для виявлення (ідентифікації) того моменту, коли щось відбувається, як в абсолютному значенні — в певний час, так і у відносному — порівняно з іншими подіями. Пошук у часовій області також може надати інформацію про повторення. Також корисними є універсальні можливості запуску та глибока пам'ять захоплення сигналів.

Необхідні прилади повинні мати смугу пропускання ширшу, ніж у сигналу, що становить інтерес.

Частотна область найкраще підходить для визначення того, що відбувається в спектрі. Наприклад, вимірювання спектра розділяє сигнал на всі його частотні складові та їхні відповідні величини. Це дає можливість спостерігати і розуміти (аналізувати, інтерпретувати) статичну і динамічну поведінку різних типів сигналів (наприклад, безперерв-

них, імпульсних, модульованих і т.д.). Якщо необхідна демодуляція і детальний аналіз, прилади повинні працювати на досить високих частотах, мати достатній динамічний діапазон і мати можливість векторного аналізу сигналу.

Аналізатор спектра в реальному часі (*real-time spectrum analyze, RTSA*) поєднує в собі обидва підходи. Наприклад, спектрограма в реальному часі представляє частотні спектри залежно від часу і використовує колір для по-

значення амплітуди (рис. 1). Щоб допомогти візуалізувати активність сигналу у високодинамічних середовищах, дисплеї густини показують, як сигнали змінюються з часом і показують наявність перехідної активності (рис. 2).

РОЗУМІННЯ, ЩО TAKE RTSA

Фраза «аналіз в реальному часі» і можливості, які вона передбачає, означають різні речі для різних людей. На щастя, послідовну основну концепцію можна визначити наступним чином: в аналізаторі спектра або сигналу з цифровою секцією проміжної частоти (ПЧ) робота в реальному часі — це стан, в якому всі вибірки сигналу обробляються безперервно і без пропусків для отримання якогось результату вимірювання або запуску операції. У більшості випадків результати вимірювань — потужність або амплітуда — є скалярними, як і при традиційних вимірюваннях спектра.

Виявлення активності сигналу без пропусків

Досягнення ширшої смуги аналізу в реальному часі вимагає вищих частот дискретизації та обробки. Отже, певний рівень обчислювальних можливостей має максимальну смугу пропускання, вище якої апаратне забезпечення для обробки сигналів не може встигати за потоком вибірки (рис. 3)¹.

Загалом, потоковий набір спектрів, отриманий в результаті обробки в реальному часі, можна використовувати одним з двох способів: об'єднати спектри в композитне відображення спектра або послідовно порівнювати його з граничною маскою для реалізації тригера за частотною маскою. Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що радіочастотний аналізатор реального часу має п'ять ключових характеристик: аналіз без пропусків, високошвидкісні вимірювання, стабільна швидкість вимірювань, вдосконалені комбіновані дисплеї та запуск за частотною маскою (*frequency-mask triggering, FMT*).

Представлення результатів у реальному часі

Все це відбувається напролюд швидко. Наприклад, аналізатори реального

¹ Близьким за значенням терміном є смуга пропускання в реальному часі (*real-time bandwidth, RTBW*), яка є найширшим діапазоном вимірювань, в якому аналізатор може підтримувати роботу в реальному часі

РОЗУМІННЯ РОІ НА ПРАКТИЧНОМУ РІВНІ

Слово «ймовірність» передбачає залежність від статистики, яка може бути виражена у відсотках або частинах на мільйон. Хоча це правильний підхід, ті, хто використовує аналізатори спектра або сигналів для виявлення неясних сигналів, хочуть знати: «Яка найкоротша тривалість події, яку я можу надійно спостерігати?». Цю величину найкраще виражати в одиницях часу.

Завдяки швидким широкосмуговим АЦП і швидким процесорам ЦОС стало можливим обробляти цілу смугу частот. Для ідентифікації подій, що становлять інтерес, можна встановити енергетичні, спектральні та логічні критерії, які можна використовувати для визначення мінімальних якостей, яким має задовольняти подія, щоб гарантувати її виявлення. Це також означає, що вимірювання можна налаштувати таким чином, щоб воно з упевненістю підтверджувало, що жодної небезпечної події взагалі не відбулося. Для якісного обговорення РОІ і ситуацій, коли ймовірність набагато менша за 100 відсотків, будь ласка, зверніться до технічної інструкції «Вимірювання гнучких сигналів і динамічних сигнальних середовищ», номер публікації 5991-2119EN.

часу Keysight N9032B PXA і N9042B UXA можуть виробляти 4800000 спектрів в секунду, хоча більшість людей можуть бачити лише частину з них. Тому, щоб скористатися перевагами результатів у реальному часі, кожне оновлення дисплея повинно об'єднувати і представляти 160000 результатів у зручному вигляді.

У цій ситуації найінформативніші результати вимірювань можна отримати, зібравши статистику і показавши, як часто зустрічається певне значення вимірювання (наприклад, певна амплітуда на певній частоті). Ця гістограма результатів вимірювань є спектральним вимірюванням, покращеним для демонстрації частоти появи, і може вважатися зворотною формою ймовірності.

Як було показано раніше на рисунку 2, ці дані кодуються за допомогою кольору або інтенсивності спектрограми, а також може бути додана функція збереження (персистенції), щоб

зосередити увагу на найсвіжіших подіях, коли старіші дані зникають. Дані спектрограми, такі як останнє оновлення окремого дисплея або середнє значення всіх значень даних в межах інтервалу, також можуть бути відображені у вигляді спектрограми, подібно до традиційного вимірювання спектра.

Такий підхід дозволяє побачити і сфокусуватися на нечастих подіях або перехідних процесах, а потім відокремити їх від інших характеристик сигналу. Змінюючи значення персистенції і схеми кольорних вагових коефіцієнтів, можна виділити специфічну активність. N9032B/N9042B в режимі реального часу ще більше розширюють ці можливості, надаючи повний набір функцій маркера спектрограми з відображенням персистенції².

² Опція RTSA може бути додана до нових або існуючих аналізаторів сигналів Keysight UXA, PXA і MXA серії X. Моделі з попередньо встановленою опцією вказані у вступному розділі цієї статті.

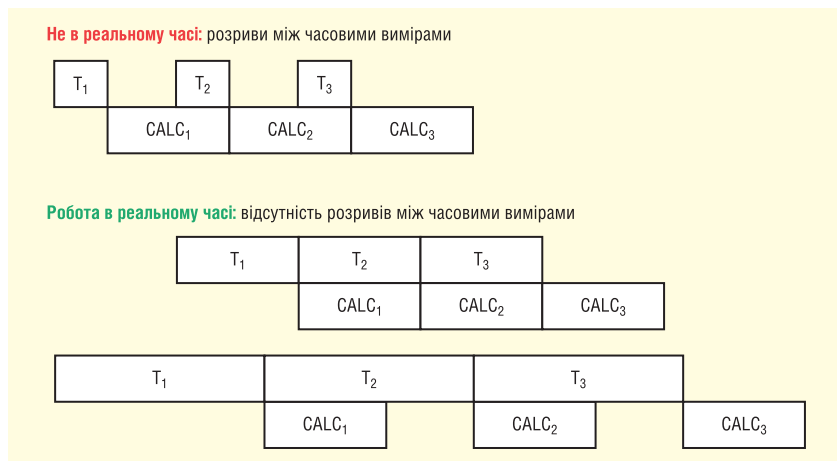


Рис. 3. Робота в реальному часі відбувається тоді, коли швидкість обчислень є достатньо високою, щоб забезпечити безпроблемний аналіз даних вибірки

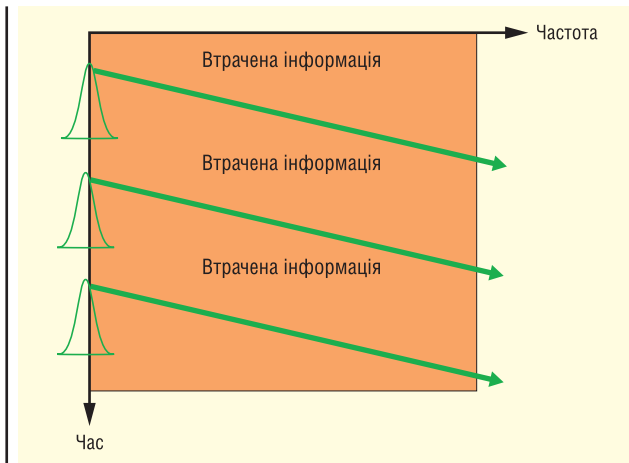


Рис. 4. Аналізатор з розгорнутою смугою (свіп-аналізатор) пропускає дані, коли події відбуваються далеко від миттєвої частоти LO і, таким чином, за межами RBW

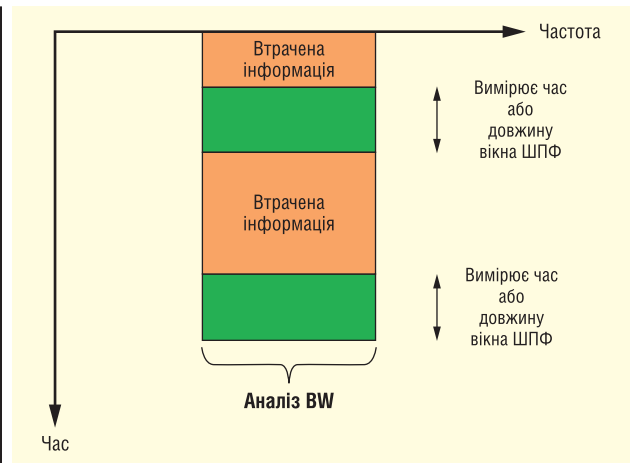


Рис. 5. Аналізатор на основі ШПФ пропускає події, які відбуваються між блоками дискретизованих часових даних

Порівняння RTSA з іншими методами

Ключовою ідеєю RTSA є «відсутність пропусків». Це основна відмінність від аналізу розширеного спектра та аналізу сигналів на основі ШПФ.

У традиційному аналізі розширеного спектра локальний осцилятор (*local oscillator, LO*) сканує потрібний діапазон частот з фіксованою шириною смуги пропускання (*resolution bandwidth, RBW*). Як показано на рисунку 4, аналізатор пропускає все, що відбувається за межами рухомого вікна (зони) перегляду.

При аналізі сигналів на основі ШПФ швидкість обробки, або час обчислення, є обмежувальним фактором. Як показано на рисунку 5, аналізатор збирає повний блок часових відліків, а потім обчислює спектр в частотній області. Якщо прилад не оснащений

високошвидкісною обробкою, між кожним блоком даних часової області будуть пропуски, і прилад пропустить будь-які події, що відбуваються в межах цих проміжків.

Кінцевий результат: ці методи забезпечують хороший огляд стабільних або безперервних сигналів. Однак активність, яка відбувається в проміжках, може бути помічена випадковим чином або взагалі пропущена.

ПОЧАТОК РОБОТИ: ОСНОВИ ШПФ

За своєю суттю, аналіз спектра в реальному часі — це потужна варіація аналізу спектра на основі ШПФ. В основі обробки на основі ШПФ лежать ті самі характеристики, які в кінцевому підсумку визначають РО: частота дискретизації, довжина часового запису

(або розмір ШПФ), функція вікна, розмір вікна, обробка перекриття і рівень шуму. Обробка сигналу відбувається наступним чином:

- Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) дискретизує вхідний сигнал, а частота дискретизації визначає максимальний діапазон частот, який можна проаналізувати.
- Вибірки АЦП зберігаються в буфері пам'яті, який іноді називають часовим записом. У N9032B/N9042B цей буфер завжди містить 1024 вибірок. Деякі аналізатори надають користувачеві можливість вибору розміру часового запису, як правило, в ступені двійки: 32, 64, 128... 1024, 2048 і більше.
- Якщо використовується масштабування, дані переводяться до потрібної центральної частоти та округлюються до вибраного користувачем діапазону вимірювання. Округлені дані використовуються для заповнення даних часового запису.
- Тривалість запису часу обернено пропорційна частоті дискретизації. Наприклад, на N9032B PXA і N9042B UXA частота дискретизації 100 МГц і 1024 точки запису часу дорівнює запису часу тривалістю 1 мкс. Чим нижча частота дискретизації, тим довший часовий запис³ (за умови фіксованої кількості точок).
- Амплітудно-зважена або «віконна» функція застосовується до часового запису для компенсації можливих розривів на початку або в кінці блоку відліків. Ослаблення відліків на

ІНШІ СПОСОБИ УНИКНЕННЯ РОЗРИВІВ

Різні підходи задовольняють частини визначення «реального часу» і забезпечують основні типи аналізу в реальному часі для деяких застосувань. Наприклад, векторні аналізатори сигналів використовують захоплення сигналу і подальшу обробку для отримання результатів без розривів на час захоплення — який може бути дуже довгим, але не нескінченним — і можуть забезпечити глибший аналіз, наприклад, у часовій області, а також аналогову або цифрову демодуляцію. Цей тип операцій задовольняє деякі потреби користувачів — і деякі визначення реального часу — краще, ніж аналіз лише спектра нескінченної довжини.

Деякі векторні аналізатори сигналів також використовують обробку амплітуди сигналу в реальному часі (а не обробку спектра) для реалізації тригера амплітуди ПЧ необмеженої довжини, який є кращим за FMT для одних вимірювань і хорошим доповненням для інших.

Багато сучасних аналізаторів пропонують опції для потокової передачі даних з обладнання. Широкопasmовий радіосигнал оцифровується і перетворюється на потік без пропусків, який потім надсилається на високошвидкісний RAID-накопичувач, де дані записуються у файл і можуть бути проаналізовані в подальшому.

³ Час на точку є оберненою величиною до швидкості дискретизації, а довжина часового запису — це час на точку, помножений на кількість точок. У цьому випадку $1 \text{ мкс} = (1/108) \times 1024$.

Таблиця 1. Кожна функція вікна має свої переваги та недоліки

| Функція вікна | Амплітудна точність | Частотна вибірковість | Динамічний діапазон/ рівень шуму |
|-----------------------|--|--|--|
| Прямокутна рівномірна | Відмінна з сигналами в межах смуги пропускання, погана з сигналами поза смугою пропускання | Відмінна з сигналами в межах смуги пропускання, погана з сигналами поза смугою пропускання | Відмінна з сигналами в межах смуги пропускання, погана з сигналами поза смугою пропускання |
| Блекмана-Харріса | Хороша | Хороша | Хороша |
| Пласка (Flattop) | Найкраща | Посередня | Хороша |
| Гаусса | Хороша | Хороша | Хороша |
| Ганнінга | Посередня | Хороша | Посередня |
| Кайзера | Хороша | Хороша | Хороша |

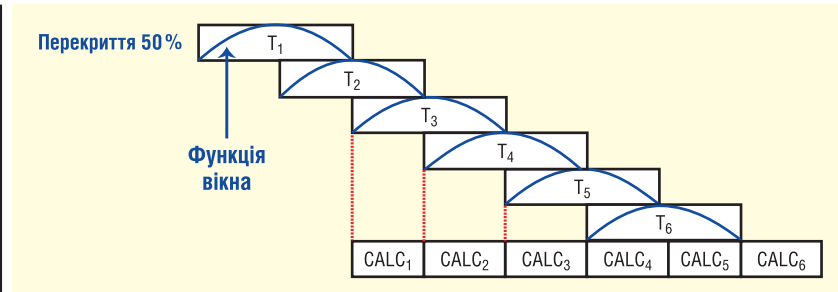


Рис. 6. При обробці з перекриттям послідовні часові записи містять суміш наявних і нових зразків, але виміряні дані залишаються без пропусків

початку та в кінці запису усуває ці розриви та їхні небажані спектральні ефекти.

- Найкращий вибір віконної функції залежить від типу сигналу. Форма вікна в часовій області впливає на амплітудну точність і частотну вибірковість в частотній області.
- Для забезпечення додаткової функціональності RBW в аналізаторах, які використовують фіксований розмір запису часу, розмір вікна (в точках) можна змінювати, вибираючи різні варіанти RBW. В аналізаторах N9032B/N9042B розмір можна встановити в ступені двійки: 32, 64, 128, 256, 512 або 1024. Це має майже такий самий чистий ефект, як і запис часу змінного розміру. Загалом, вищий вибір RBW призведе до меншої мінімальної тривалості для 100-відсоткової POI.
- Сигнали, які займають весь часовий запис, покажуть точну амплітуду. Для сигналів, які не охоплюють весь часовий запис, необхідно компенсувати вплив віконної функції; щоб збільшити ймовірність того, що якась частина сигналу потрапить в центр часового запису, часові записи обробляються з перекриттям (накладанням, дублюванням) (рис. 6).

ШПФ виконується на послідовних блоках відліків, незалежно від того, накладені вони чи йдуть послідовно один за одним. Кількість ліній роздільної здатності в частотному спектрі безпосередньо пов'язана з кількістю точок у часовому записі. Наприклад, блок з

1024 точок перетворюється на спектр з приблизно 821 або 855 смугами, залежно від коефіцієнта Найквіста.

Після перетворення часових даних у частотну область за справу береться механізм візуалізації. Як проміжний крок, до розрахованих спектрів можна застосувати тригер частотної маски, що призведе до подальших вимірювань і обробки відображення, коли будуть виконані критерії тригера.

РОБОТА З ВІКОННИМИ ЕФЕКТАМИ

Більшість аналізаторів надають користувачеві різноманітні віконні функції, які можна вибрати. Найкращий вибір залежить від чотирьох ключових факторів: характеру самого сигналу в часовій області, бажаної частотної вибірковості, амплітудної точності та динамічного діапазону результатів в частотній області. У таблиці 1 наведено швидке порівняння шести найпоширеніших функцій вікна.

Одним з ключових моментів, який впливає на точність отриманої амплітуди, є те, чи потрапляє перетворений сигнал на або між дискретними частотними смугами (або лініями) в кінцевому спектрі. Пласке вікно є найбільш точним, оскільки воно має ширшу основну пелюстку в частотній області та показує правильну амплітуду, незалежно від того, чи потрапляє сигнал у смугу, чи ні. Прямокутне вікно є найменш по-блажливим, оскільки воно не компенсує

розриви, спричинені несиметричними сигналами; воно має найвужчу форму (або найвищу добротність) у частотній області для сигналів з рознесенням, але має найбільші амплітудні помилки для несиметричних сигналів⁴.

Ширина головних пелюсток також впливає на частотну вибірковість або роздільну здатність. Ось чому вікно з пласкою вершиною забезпечує чудову точність амплітуди, але досить низьку частотну вибірковість: для досягнення пласкої вершини йому потрібна широка головна пелюстка. Багато інших функцій вікна забезпечують хороший компроміс між частотною вибірковістю і амплітудною точністю.

Наостанок, важливо також відзначити взаємозв'язок між кількістю точок вікна (або ШПФ) і рівнем шуму. Для будь-якого вікна менша кількість точок означає вищий рівень шуму. Це пояснюється тим, що функція з вужчим вікном має меншу площу під кривою в часовій області, а це означає, що результат ШПФ повинен бути помножений на більший масштабний коефіцієнт, щоб отримати правильне значення амплітуди в частотній області. З математичного погляду, більший масштабний коефіцієнт призводить до вищого рівня шуму. З радіочастотного погляду, менша кількість точок означає ширшу смугу пропускання і, отже, ширшу еквівалентну смугу шуму.

Далі буде

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,
http://unitest.com**



⁴ З рівномірним ваговим коефіцієнтом, що дорівнює одиниці у всіх точках, прямокутна або рівномірна форма взагалі не є вікном.