

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

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

ОБРОБКА КОРОТКИХ СИГНАЛІВ

Усереднення та обробка з перекриттям разом дають змогу обробляти складні сигнали, тривалість яких перевищує або тривалість часового запису, або ширину вікна. Обробка з перекриттям має ще одну корисну властивість: вона забезпечує кращу амплітудну точність для перехідних сигналів, які коротші за тривалість запису або вузчі за ширину вікна.

Якщо імпульс сигналу має меншу тривалість, ніж часовий запис, і потрапляє в часовий запис або вікно, на його амплітуду впливатиме форма віконної функції в часовій області. Амплітуда в частотній області буде відображатися з меншою точністю ніж це було б з постійним синусоїдальним сигналом (*Continuous Waveform, CW*). Точність відображення пропорційна сумі коефіцієнтів вікна, зайнятого сигналом, порівняно з сумою всіх коефіцієнтів вікна.

Щоб спростити розгляд, розглянемо сигнал на часовому записі, на який не впливає «гребінчастий» розкид частот,

спричинений усіма вікнами, окрім вікна з плоским верхом. В аналізаторі ми візьмемо частоту дискретизації в комплексному значенні 200 Мегасемплів/с (яку можна досягти на аналізаторах N9032B PXA і N9042B UXA, використовуючи смугу аналізу 160 МГц), 1024-точковий часовий запис і 1024-точкову віконну функцію Блекмана-Гарріса (Blackman-Harris). Щоб отримати такі ж амплітудні показники, як і для CW-сигналу, сигнал короткої тривалості повинен був би охопити всі 1024 вибірки, що потрапляють у вікно. Це дорівнює тривалості 5.12 мкс, що дорівнює просто кількості вибірок, поділена на частоту дискретизації ($1024 / (200 \cdot 10^6)$).

Тепер припустимо, що сигнал триває четверту частину цього часу, і розглянемо два випадки. В одному випадку сигнал випадково збігається з центром вікна; в іншому — сигнал з'являється на крайньому лівому краю вікна (рис. 7). Зверніть увагу, що амплітуда прикладу сигналу була постійною протягом імпульсу; варіація, яку ми бачимо на рисунку 7, викликана застосуванням форми вікна.

Сума коефіцієнтів 256 точок в середині вікна дорівнює 228 256, сума 256 точок на лівому краю — лише 12 829, а сума всіх коефіцієнтів — 367 000. В результаті перший сигнал матиме амплітуду в частотній області на -4.125 дБ нижчу, ніж очікуваний CW-сигнал (від $20 \cdot \log(228\,256/367)$), а другий виявиться на -29.129 дБ нижчим за CW-сигнал (від $20 \cdot \log(12\,829/367)$).

Обробка перекриття компенсує цей ефект, обчислюючи, використовуючи частину відліків з попереднього часового запису, а частину — з поточного. Це можливо, якщо процесор ШПФ може видавати результати швидше, ніж надходять нові відліки. Чим більша різниця між цими двома швидкостями, тим більша можлива кількість перекриттів. Ви можете уявити обробку ШПФ як прокручування часових відліків, з кроком прокручування (γ часі), пропорційним оберненому до відсотка перекриття.

В N9032B PXA процесор ШПФ може генерувати до 4 800 000 000 ШПФ за секунду (f_p), а частота дискретизації в комплексному значенні становить f_s . Формула для максимальної кількості точок, що перебиваються (P), наступна⁵:

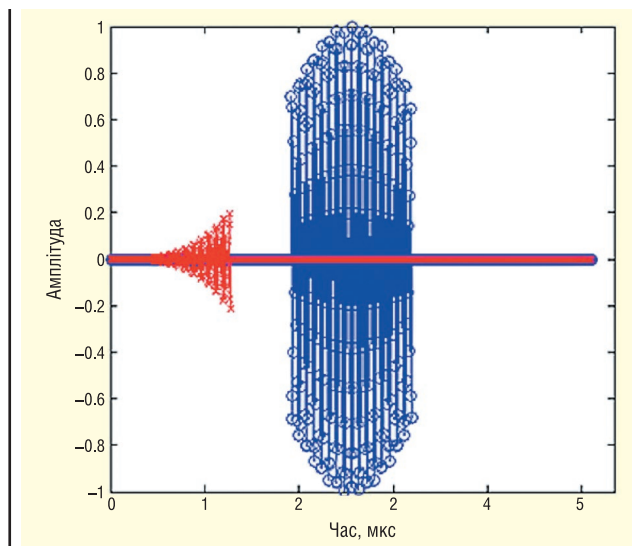


Рис. 7. Обидва сигнали становлять четверту частину тривалості часового запису, а на амплітуду впливає місце, де вони виникають відносно форми вікна

⁵ Для PXA це означає, що індикатор залежності потужності від часу (power-versus-time, PVT) вимкнено. Коли PVT увімкнено, перекриття можна зменшити, щоб забезпечити узгодженість даних між часовою та частотною областями

Таблиця 2. При меншій частоті дискретизації максимальна кількість перекриттів зростає

Швидкість ШПФ, МГц	Смуга, МГц	Перекриття (точки)
4.678	2000	512
4.677	1500	624
4.586	1000	752
4.684	255	960
3.313	170	960

$$P = \min \left(960.8 \cdot \left[\frac{L_F \cdot \frac{f_F - f_s}{f_F}}{8} \right] \right),$$

де 960 — максимальне перекриття, а будь-яке перекриття між 512 і цим максимумом може бути зроблено з кроком 8.

Таким чином, коли N9032B/N9042B працює з максимальною частотою дискретизації, максимальна кількість точок, що перекриваються, становить 512. У таблиці 2 наведено значення перекриття для різних частот дискретизації.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ POI

Маючи в основі попередні результати, ми можемо визначити мінімально досяжне значення POI при певних діапазонах вимірювань і розмірах вікон. У цьому випадку робота у зворотному напрямку від діапазону відповідей може полегшити подальше обговорення.

У таблиці 3 показано значення POI для N9032B PXA при різних діапазонах і частотах дискретизації з відповідними значеннями перекриття. Зверніть увагу, що вузькі вікна і вища частота дискретизації призводять до меншої тривалості, але при-

зводять до появи вікон, що не перекриваються (значення без зірочок). Як зазначалося раніше, PXA завжди використовує 1024-точкове ШПФ. Незважаючи на те, що ці ШПФ перекриваються, деякі вибірки множаться на нуль у віконній функції менших вікон. Це призводить до появи ділянок, які не мають ненульових значень у часі (тобто «проміжків між вікнами»).

Крім того, «тривалість» у таблиці 3 означає мінімальну тривалість сигналу, що становить інтерес, якщо його можна виявити зі 100-відсотковою ймовірністю і виміряти з такою самою точністю амплітуди, як і для сигналу CW. Тут найкоротша можлива тривалість сигналу — 0.48 мкс — спостерігається при діапазоні 160 МГц (або смузі аналізу) і функції 32-точкового вікна.

Для обчислення значення тривалості ми використовуємо наступне рівняння:

$$T_{min} = [(розмір\ вікна + (довжина\ часового\ запису - 1)) - P] / f_s,$$

Оскільки N9032B PXA має фіксовану довжину часового запису 1024 відліки, рівняння набуває наступного вигляду:

$$T_{min} = [розмір\ вікна + 1023 - P] / f_s.$$

Для N9032B PXA мінімальне значення 227 нс є результатом наступного:

$$T_{min} = (32 + 1023 - 512) / (2.395 \cdot 10^9) = 227 \text{ нс}.$$

Ключове питання: як ми прийшли до формули для чисельника? Визначальним фактором є мінімальна кількість точок, яка необхідна для досягнення повної амплітудної точності. Цей мінімум є функцією розміру вікна, довжини часового запису, максимального значення перекриттів та, в результаті, взаємного розташування вікон у будь-яких двох сусідніх часових записках.

Для ілюстрації розглянемо два контрастні випадки для сусідніх часових записів в N9032B PXA:

Таблиця 3. В аналізаторі комбінація факторів визначає мінімально досяжне значення POI

Смуга, МГц	Швидкість дискретизації, МГц	Перекриття (точки)	Тривалість для вікна розміром 1024 пікселів (RBW1)	Тривалість для вікна розміром 512 пікселів (RBW2)	Тривалість для вікна розміром 256 пікселів (RBW3)	Тривалість для вікна розміром 128 пікселів (RBW4)	Тривалість для вікна розміром 64 пікселів (RBW5)	Тривалість для вікна розміром 32 пікселів (RBW6)
2000	2395	512	641 нс*	427 нс	320 нс	267 нс	240 нс	227 нс
1500	1871	624	761 нс*	487 нс*	350 нс	282 нс	247 нс	230 нс
1000	1247	752	1.04 мкс*	628 нс*	423 нс	320 нс	269 нс	243 нс
255	299.8	960	3.63 мкс*	1.92 мкс*	1.06 мкс*	637 нс*	424 нс	317 нс
160	199.6	960	5.45 мкс*	2.88 мкс*	1.60 мкс*	0.96 мкс*	0.64 мкс	0.48 мкс
80	99.8	960	10.89 мкс*	5.76 мкс*	3.20 мкс*	1.91 мкс*	1.27 мкс	0.95 мкс
20	24.9	960	43.58 мкс*	23.05 мкс*	12.79 мкс*	7.66 мкс*	5.09 мкс	3.81 мкс

* Вікна перекриваються

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ
АВТОРИЗОВАНИЙ ДИСТРИБ'ЮТОР В УКРАЇНІ
 продаж • навчання • сервіс

ТОВ «ЮНІТЕСТ»
 вул. Олеся Гончара, 6
 04053, м. Київ, Україна
 тел: +38 (044) 272-60-94
 тел./факс: +38 (044) 272-60-95
 e-mail: web@unitest.com
 http://www.unitest.com

Авторизований дистриб'ютор

- випадок 1: 1024-точковий часовий запис, 1024-точкове вікно і нульове перекриття (рис. 8);
- випадок 2: 1024-точковий запис часу, 1024-точкове вікно і максимальне перекриття (рис. 9).

Хоча перекриття не вибирається користувачем, воно є корисним для цієї задачі при обчисленні POI.

У 1024-точковому часовому записі без перекриття центри сусідніх часових записів знаходяться на відстані 1024 точки один від одного⁶. Найгірше співвідношення між сигналом і двома сусідніми вікнами відбувається тоді, коли сигнал потрапляє на середину між центрами вікон.

Як зазначалося раніше, короточасний сигнал зареєструє точність амплітуди, подібну до CW-сигналу, лише якщо його тривалість охоплює весь час запису. Для послідовних часових записів, що не перекриваються, сигнал повинен тривати майже два повних записи. У цьому випадку мінімальна тривалість, необхідна для того, щоб одне з двох вікон отримало 1024 відліки, становить (1024 + 1023) або 2047 відліків.

Далі розглянемо другий випадок з 1024-точковим часовим записом, 1024-точковим вікном і максимальним перекриттям. Оскільки центри вікон тепер знаходяться на відстані 512 відліків один від одного (1024–512), сигнал може тривати 1535 відліків (2047–512) і все ще забезпечувати точне вимірювання амплітуди.

Необхідну тривалість сигналу у відліках можна обчислити за такою формулою:

$$N = (\text{розмір вікна} + \text{тривалість часового запису} - 1) - P.$$

Це, звичайно, чисельник з розрахунку POI. P — це максимальна кількість точок перекриття:

$$P = \min \left(960.8 \cdot \left[\frac{L_f \cdot \frac{f_f - f_s}{f_f}}{8} \right] \right).$$

Підставивши значення з нашого другого прикладу, ми отримуємо наступний результат:

$$N = (1024 + 1024 - 1) - 512 = (2047) - (512) = 1535.$$

Пройшовши повне коло, ділення N на частоту дискретизації (f_s) дає міні-

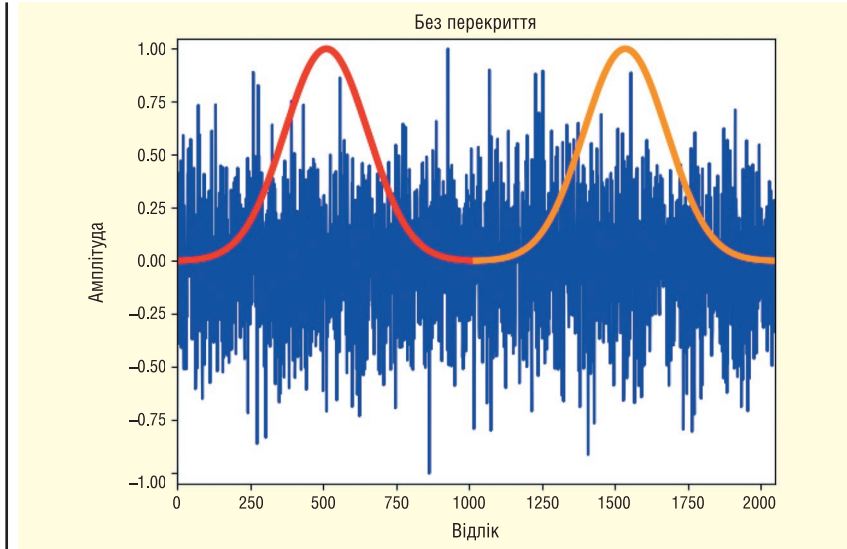


Рис. 8. У цьому випадку дискретизований сигнал охоплює два 1024-точкові часові записи і заповнює принаймні одне з вікон

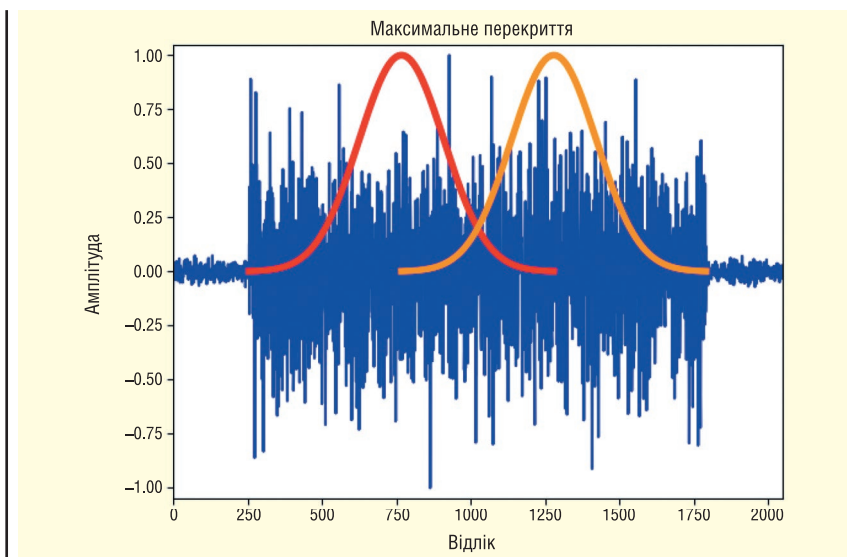


Рис. 9. При максимальному перекритті для того, щоб хоча б одне з вікон містило 1024 відліки, потрібно лише 1535 відліків сигналу, що дискретизується

мальну тривалість сигналу, яку можна виміряти з точністю амплітуди, як у CW-сигналу:

$$T_{min} = 1535 / 2395 \cdot 109 = 641 \text{ нс.}$$

Це значення відповідає першому значенню в стовпчику «Тривалість» таблиці 3. Таким чином, при частоті дискретизації 2.4 ГГц, смузі аналізу 2 ГГц, 1024-точковому часовому записі, 1024-точковому вікні і максимальному перекритті (341 точка) сигнал тривалістю 641 нс завжди буде вимірний з повною амплітудною точністю. Сигнал тривалістю 428 нс може бути вимірний точно, якщо він знаходиться в центрі віконної функції; однак, точність може бути гарантована тільки якщо він триває 641 нс.

У деяких випадках точність амплітуди може бути менш важливою, ніж просто виявлення сигналу. На щастя, можна виявляти події значно меншої тривалості зі 100-відсотковою ймовірністю, працюючи з RTSA в режимі, який вже не забезпечує задану амплітудну точність.

Для PXA N9032B з частотою дискретизації 2.4 ГГц теоретичний мінімум становить 5 нс:

$$T_{min} = 1 / (2.4 \cdot 10^9) = 417 \text{ пс} \quad (1024 - \text{ часовий запис та прямокутне вікно}).$$

Реально досягне мінімальне значення залежить від таких факторів, як швидкість дискретизації, функція вікна, рівень тригера, рівень шуму і максимальна амплітуда сигналу, що цікавить. Зсув між

⁶ У PXA це відбувається для будь-якого вибраного розміру вікна, оскільки воно буде відцентроване в середині 1024-точкового часового запису.

Таблиця 4. Розраховані значення мінімальної довжини сигналу для 100-відсоткової ймовірності виявлення показані як функція зсуву між амплітудою вхідного сигналу та рівнем шуму аналізатора (аналізатор сигналів N9032B PXA)

Смуга, МГц	Швидкість дискретизації, МГц	Перекриття (точки)	Тривалість, зсув 0 дБ	Тривалість, зсув 6 дБ	Тривалість, зсув 12 дБ	Тривалість, зсув 20 дБ	Тривалість, зсув 40 дБ	Тривалість, зміщення 60 дБ
2000	2395	512	0.64 мкс	0.22 мкс	0.13 мкс	0.07 мкс	0.01 мкс	0.001 мкс
1500	1871	624	0.76 мкс	0.22 мкс	0.12 мкс	0.05 мкс	0.01 мкс	0.001 мкс
1000	1247	752	1.04 мкс	0.23 мкс	0.11 мкс	0.05 мкс	0.01 мкс	0.002 мкс
255	299.8	960	3.63 мкс	0.68 мкс	0.32 мкс	0.13 мкс	0.02 мкс	0.007 мкс
160	199.6	960	5.45 мкс	1.02 мкс	0.49 мкс	0.20 мкс	0.03 мкс	0.01 мкс
80	99.8	960	10.90 мкс	2.03 мкс	0.97 мкс	0.39 мкс	0.05 мкс	0.02 мкс
20	24.9	960	43.62 мкс	8.14 мкс	3.89 мкс	1.56 мкс	0.20 мкс	0.08 мкс

Таблиця 5. Рішення для вимірювання RTSA від Keysight

Номер моделі	Мак. частота	Макс. смуга пропускання	Фазовий шум на 1 ГГц, зміщення 10 кГц	DANL на 1 ГГц (з NFE)	Максимальна смуга аналізу RTSA
N9042B	110 ГГц	4 ГГц	-135 дБн/Гц	-174 дБм	2 ГГц
N9041B	110 ГГц	1 ГГц	-135 дБн/Гц	-174 дБм	255 МГц
N9040B	50 ГГц	1 ГГц	-135 дБн/Гц	-174 дБм	510 МГц
N9032B	50 ГГц	2 ГГц	-136 дБн/Гц	-174 дБм	2 ГГц
N9030B	50 ГГц	510 МГц	-136 дБн/Гц	-174 дБм	510 МГц
N9021B	50 ГГц	510 МГц	-130 дБн/Гц	-172 дБм	509 МГц
N9020B	50 ГГц	160 МГц	-114 дБн/Гц	-172 дБм	160 МГц
N9038B	44 ГГц	160 МГц	-113 дБн/Гц	-174 дБм	160 МГц
N99xx Fieldfox	54 ГГц	120 МГц	-111 дБн/Гц	-144 дБм	120 МГц

рівнем шуму аналізатора і амплітудою вхідного сигналу є ключовим визначальним фактором: чим більший цей зсув, тим менша мінімальна тривалість, яку можна виявити; чим менший зсув (особливо менше ніж 20 дБ), тим більша ймовірність того, що шум заважає вимірюванню.

У таблиці 4 наведено діапазон значень мінімальної тривалості для 100-відсоткової ймовірності його виявлення в N9032B PXA з використанням вікна Блекмана-Харріса. Щоб підкреслити відмінності, в таблиці наведено п'ять прикладів швидкості дискретизації та шість різних рівнів зсуву, які є відношенням сигнал/шум або, точніше, відношенням сигнал/маска (через можливий вплив налаштувань тригера та обраної функції вікна).

Для подальшого покращення цих вимірювань, N9032B PXA може представляти дані в часовій області і повний 2-ГГц спектр на дисплеї з декількома областями. Це ідеально підходить для виявлення дуже коротких перехідних процесів.

Інтеграція тригера RTSA в VSA 89601C

Тригери частотної маски RTSA і тригери з часовою затримкою також доступні в програмі VSA 89601C, якщо на аналізаторі X-Series встановлено програмне забезпечення VSA. Потрібен додатковий тригер частотної маски FT1/FT2 або N90EMFT1B/N90EMFT2B.

Запуск програмного забезпечення VSA за допомогою тригера RTSA спрощує аналіз непостійних сигналів за допомогою додаткових інструментів векторного аналізу сигналів.

ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ ТА ПОВЕРТАЄМОСЯ ДО ГОЛОВНОЇ МЕТИ

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 аналіз спектра в реальному часі, збирати дані в реальному часі або робити і те, і інше.

Компанія Keysight пропонує такі рішення для вимірювання RTSA (табл. 5) У середині аналізатора значення ROI залежить від взаємодії шести основних факторів: частоти дискретизації, тривалості запису (або розміру ШПФ), функції вікон, розміру вікна, обробки перекриття та рівня шуму. Як показано тут, правильний вибір цих значень може дозволити спостерігати сигнали, які тривають лише кілька мікросекунд. На практиці часто можна надійно виявити сигнали, які тривають лише кілька наносекунд.

Описані тут типи вимірювань спектрального аналізу в реальному часі дозволяють просто спостерігати за неявним

сигналом — і цього може бути достатньо в багатьох ситуаціях. В інших випадках спостереження за сигналом є першим кроком до більш детального аналізу. Після того, як поведінка сигналу зрозуміла, ці характеристики можуть бути використані для визначення тригера частотної маски, який ініціює або конкретне вимірювання, або захоплення часового проміжку.

Якщо використовується режим захоплення часового проміжку, захоплений блок відліків можна багаторазово аналізувати неруйнівним методом, використовуючи різні налаштування: діапазон, центральна частота, віконна функція, перекриття тощо. У режимі захоплення/відтворення можна виявити і точно проаналізувати сплески тривалістю до декількох відліків, оскільки перекриття можна встановити на рівні 99.99% (фактично один відлік), а також можна використовувати спектр з часовою дискретизацією. При максимальній смузі пропускання 2 ГГц це відповідає тривалості сплеску в кілька десятків наносекунд. Крім того, амплітудні дані можуть бути відновлені для сигналів дуже короткої тривалості шляхом використання менших розмірів вікон з максимальним перекриттям. Нарешті, з додаванням програмного забезпечення 89600 VSA, захоплений сигнал може бути демодульований і надалі детально проаналізований з різних аспектів з широким спектром корисних перспектив.

Більш детальну інформацію щодо продукції компанії Keysight Technologies можна отримати, звернувшись до офіційного дистрибутора 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**

CN

* Закінчення. Початок див. CHIP NEWS, № 2, 2024 р.