

# Нові методи аналізу імпульсних сигналів радіолокаційних систем і засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ)

**У статті розглядається використання передових засобів вимірювань і новітніх розробок для різних видів аналізу імпульсних сигналів, а також методи відображення та аналізу для різних типів сигналів і вимірювальних завдань. Крім того, розглядаються основні методики виявлення та обробки сигналів, такі як запуск за амплітудою сигналу проміжної частоти (ПЧ) і за частотною маскою, захоплення і постобробка сигналів.**

## ВСТУП

Імпульсні сигнали широко використовуються в системах радіолокації та РЕБ, і точне вимірювання їхніх параметрів є необхідною умовою правильної оцінки загроз і створення засобів протидії. Однак через низку чинників вимірювання параметрів імпульсних сигналів є особливо важким завданням. Під час їх вимірювання необхідно враховувати таке:

- широка смуга модуляції для імпульсних сигналів, як результат малої тривалості імпульсів і крутості їхніх фронтів;
- складність сигнально-завадового середовища зумовлена, як правило, наявністю імпульсних сигналів від різних джерел, часто зі значно різними характеристиками, включно зі смуги сигналу, частотою повторення і типом модуляції;
- необхідність аналізу або формування складного сигнального середовища з широким динамічним діапазоном амплітуд імпульсів;
- необхідність демодуляції та декодування або вимірювання параметрів імпульсів зі складною модуляцією;
- складність виявлення імпульсів через дуже малий коефіцієнт заповнення, накладення інших сигналів і низький рівень середньої потужності в точці аналізу.

На щастя, багато вдосконалених технологій оброблення сигналів та аналого-цифрового перетворення, що дають можливість формувати складні імпульсні сигнали та послідовності, також призводять до появи нових ефективних

методів їхнього аналізу. Ці рекомендації щодо застосування охоплюють питання використання передових засобів вимірювань і новітніх розробок для різних видів аналізу імпульсних сигналів, а також методи відображення та аналізу для різних типів сигналів і вимірювальних завдань. Крім того, розглядаються основні методики виявлення та обробки сигналів, такі як запуск за амплітудою сигналу проміжної частоти (ПЧ) і за частотною маскою, захоплення і постобробка сигналів.

Описані тут методи аналізу реалізовані у двох програмах для всебічного аналізу імпульсних радіолокаційних сигналів. Програма для вимірювання параметрів імпульсних сигналів N9067C серії X — це новий вбудований програмний продукт для аналізаторів сигналів Keysight серії X, що представляє собою високоєфективне програмне рішення для вимірювань у смузі частот до 1 ГГц. Роботою цієї програми можна керувати як через сенсорний інтерфейс передньої панелі, так і за допомогою команд SCPI. Опція VHQ для програмного забезпечення (ПЗ) 89600 VSA додає до загальних вимірювальних функцій векторного аналізу сигналів широкий набір інструментів і статистичних звітів про характеристики імпульсів. Цей програмний продукт сумісний і з аналізаторами ВЧ-/НВЧ-сигналів, і осцилографами.

В обох програмах використовуються одні й ті самі алгоритми, що забезпечує повторюваність результатів вимірювань і певність у їхній якості. У цій статті представлено асортимент

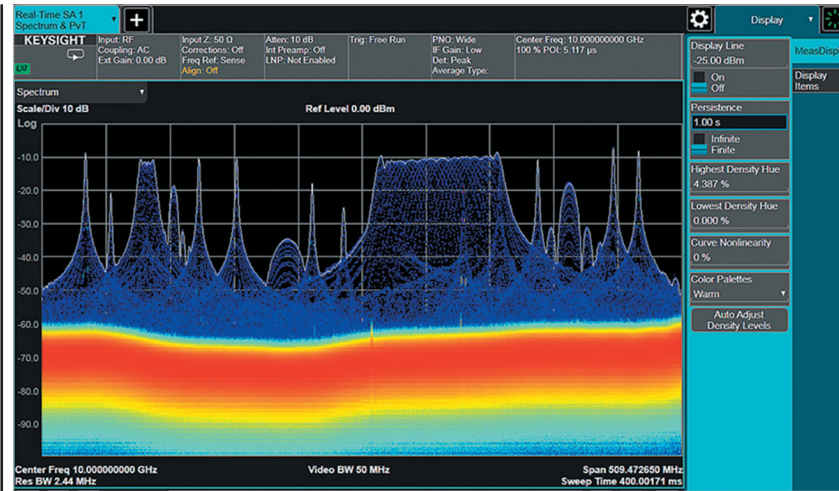
прикладного програмного забезпечення та відповідних апаратних платформ, а також доступні види запуску, безпосередньо вимірювань і візуалізації їхніх результатів.

## ІМПУЛЬСНІ СИГНАЛИ ТА СКЛАДНОЩІ ПРИ ЇХ ЗАХОПЛЕННІ

У минулому вимірювання основних параметрів імпульсних сигналів проводилися, як правило, за допомогою аналізаторів спектра. Смуга пропускання фільтра проміжної частоти (ПЧ) або смуга пропускання роздільного фільтра ПЧ (RBW) аналізатора спектра зазвичай була вузкою за ефективну смугу частот імпульсу, тому аналізатор спектра використовували для вимірювань параметрів підсумкового спектра імпульсів. Далі отримані результати вимірювань параметрів спектра імпульсного сигналу можна було використовувати для обчислення основних характеристик сигналу, таких як частота повторення або період проходження (PRI) імпульсів, коефіцієнт заповнення, потужність тощо. Аналізатори спектра також використовувалися і більш традиційними способами для проведення позасмугових вимірювань, таких як оцінка паразитних і гармонійних складових спектра імпульсних сигналів.

Такий непрямий і дещо громіздкий підхід до вимірювання параметрів імпульсних сигналів, заснований на аналізі форми спектра, був придатний для простих імпульсних сигналів і сигнального середовища, яке містить тільки одну імпульсну послідовність, де перебудова за частотою була незначною або могла бути проігнорована.

Сучасні системи використовують набагато складніші типи імпульсів, і багато сигналів або сигнальних середовищ містять безліч різних імпульсів (поряд з іншими сигналами) від одного або



**Рис. 1. Вимірювання параметрів спектра (спектральної густини) в реальному часі за умов наявності сигналів від декількох джерел**

декількох джерел, як показано на рисунку 1, що ілюструє результати вимірювань параметрів спектра в реальному часі. Ідентифікація потрібного сигналу і вимірювання його параметрів у такому сигнальному середовищі є складним завданням, яке найкращим чином вирішується за допомогою поєднання апаратних засобів і програмного забезпечення, описаних у цій статті.

Сукупність комплексних сигналів і суворих вимог до деталізації результатів вимірювань їхніх параметрів призвела до необхідності застосування сучасних методів цифрового оброблення (DSP) попередньо оцифрованих сигналів.

## ВЧ-/НВЧ-ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ

Найважливішим першим кроком є вибір основної апаратної платформи для вимірювань — вибір, який визначає склад програмного забезпечення для вимірювань параметрів імпульсних сигналів, про який ми поговоримо далі. Швидке розширення смуги пропускання аналізаторів сигналів і поліпшення роздільної здатності цифрових осцилографів постійно змінюють ситуацію в галузі вимірювань параметрів імпульсних сигналів.

Для розв'язання такого роду вимірювальних завдань зовничай використовують дві апаратні платформи для ВЧ-/НВЧ-вимірювань, показані на рисунку 2: аналізатори сигналів із широкомуговим цифровим трактом ПЧ та осцилографи або аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) із частотою дискретизації, яка є досить високою, щоб безпосередньо обробляти ВЧ-/НВЧ-сигнали

в основній смузі частот (без перенесення на ПЧ). Осцилографи забезпечують ширшу смугу пропускання, але мають гірші показники за роздільною здатністю та можливостями вимірювань нелінійних спотворень. Сучасні аналізатори сигналів забезпечують вищі характеристики в смузі частот аналізу до 1 ГГц.

Для більшості вимірювань параметрів імпульсних сигналів ці два основні підходи до побудови апаратних інтерфейсів концептуально схожі. В обох випадках на виході ВЧ/НВЧ апаратного інтерфейсу (після відповідного опрацювання) ми отримуємо потік або файл даних, що являє собою масив вибірок синфазних і квадратурних складових сигналу або сукупності сигналів (сигнального середовища). Принципова архітектурна відмінність полягає в етапі, на якому виконуються операції аналого-цифрового перетворення, і видах оброблення, яке виконують з метою обмеження області аналізу до смуги частот, що цікавить.

Аналізатори сигналів використовують фундаментальний або гармонічний

принцип змішування аналогових сигналів і аналогові фільтри для перетворення ВЧ- або НВЧ-сигналів на ПЧ, де виконуються операції аналого-цифрового перетворення.

Осцилографи (та інші пристрої аналого-цифрового перетворення, що працюють у часовій області, наприклад модульні АЦП) виконують дискретизацію ВЧ-/НВЧ-сигналів безпосередньо в основній смузі частот, а подальше перетворення з пониженням частоти та обмеження смуги частот виконують у процесі цифрового опрацювання сигналів (ЦОС).

Аналізатори сигналів і осцилографи здебільшого дають змогу виконувати ті самі виміри, проте оптимальний вибір вхідного апаратного інтерфейсу найчастіше визначається двома вимогами: смугою пропускання і динамічним діапазоном. Високошвидкісні АЦП у ВЧ-/НВЧ-осцилографах забезпечують надзвичайно широку смугу пропускання і хорошу лінійність фазової характеристики. Водночас аналізатори сигналів, що мають повільніші АЦП, але виконують смугову фільтрацію оброблюваних сигналів, забезпечують кращий динамічний діапазон. У випадках, коли їхньої смуги пропускання, що досягає нині значення 1 ГГц, достатньо, вони мають кращі характеристики з погляду виявлення і вимірювання параметрів слабких сигналів або одночасного аналізу параметрів слабких сигналів на тлі сильніших. Ці та інші переваги і недоліки будуть розглянуті нижче більш детально.

Максимальна смуга пропускання доступних нині аналізаторів сигналів становить 1 ГГц для Keysight N9040В серії UXA, 510 МГц для N9030В серії PXA і 160 МГц для N9020В серії MXA. Діапазон робочих частот під час прямих вимірів може становити до 110 ГГц в аналізаторі N9041В серії UXA або 50 ГГц в інших моделях аналізаторів



**Рис. 2. Аналізатори сигналів і осцилографи — основні апаратні платформи для вимірювань параметрів імпульсних сигналів на ВЧ і НВЧ: аналізатор сигналів Keysight серії UXA (а); осцилограф Keysight серії S (б)**

сигналів, а зовнішні змішувачі з програмним керуванням, такі як Keysight M1971E, дають змогу розширити цей діапазон до 90 ГГц за умови смуги пропускання аналізатора до 1 ГГц і смуги пропускання змішувача до 2 ГГц. Ці змішувачі з програмним керуванням оснащені інтерфейсом USB з технологією plug-and-play, яка забезпечує автоматичне конфігурування аналізатора сигналів відповідно до типу під'єданого змішувача, включно із завантаженням даних про втрати на перетворення й автоматичною компенсацією втрат у тракці гетеродина.

Одна з практичних переваг аналізатора сигналів як вимірювальної платформи полягає в його здатності забезпечувати плавне перемикання між вимірами в режимі хитання частоти, векторними вимірами та вимірами в реальному часі. Використовуючи зовнішні змішувачі з програмним керуванням, цей вимірювальний інструмент, за допомогою єдиного інтерфейсу користувача, здатний підтримувати ці можливості в широкій смузі огляду і для робочих частот до 90 ГГц.

### ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ І ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Існують різні програмні рішення для аналізу захопленого потоку дискретизованих даних про параметри сигналу в широкій смузі частот. Зазвичай для цих цілей використовують два основні типи прикладного програмного забезпечення (ПЗ).

**Вбудоване ПЗ приладів і спеціальні вимірювальні додатки**, які впродовж уже деякого часу використовуються в осцилографах. Предметом аналізу цього ПЗ є, головним чином, параметри синхронізації імпульсів і вимірювання в часовій області. Наразі для розширеного аналізу параметрів імпульсних сигналів у частотній і часовій сферах із використанням аналізаторів сигналів із широкою смугою пропускання пропонуються вбудовані програми, як-от вбудований застосунок для вимірювань параметрів імпульсів N9067C серії X.

**ПЗ для векторного аналізу сигналів (VSA)** належить до другого типу програм, що застосовуються для аналізу параметрів імпульсних сигналів. ПЗ VSA можна використовувати в поєднанні з багатьма типами ВЧ/НВЧ апаратних інтерфейсів, включно з аналізаторами сигналів, осцилографами та модульни-

ми дигітайзерами. ПЗ VSA дає змогу виконувати аналіз у часовій ділянці, але може бути особливо корисним, коли потрібно провести аналіз у частотній ділянці та демодуляцію (або аналіз якості модуляції). Базова версія ПЗ VSA 89600 забезпечує захоплення безлічі імпульсів і вимірювання різних параметрів кожного імпульсу окремо. Додавання опції ВНЧ відкриває доступ до можливостей великого статистичного багатоімпульсного статистичного аналізу, опис яких наведено нижче.

**Аналіз спектра в реальному часі (RTSA)** також є корисною функцією для вимірювань в умовах імпульсного сигнального середовища. Спочатку функцію RTSA було реалізовано у вигляді окремого типу аналізаторів спектра, оскільки для широкої смуги частот, необхідної для аналізу ВЧ-/НВЧ-імпульсів, потрібні спеціалізовані апаратні засоби, що відповідають вимогам RTSA. На щастя, нещодавній прогрес у галузі обчислювальної техніки дав змогу реалізувати цей підхід у вигляді спеціального вимірювального застосунку, який можна додати до аналізаторів сигналів загального призначення під час купівлі приладу або під час його модернізації. Концепція RTSA передбачає безперервне опрацювання вибірок сигналу або, щонайменше, опрацювання з мінімальними перервами, щоб унеможливити пропуск навіть найрідкісніших подій. Функція RTSA може бути корисною для виявлення важких для виявлення сигналів, а також гнучких налаштувань щодо запуску за імпульсами. Ці функції будуть описані нижче.

**Об'єднання перерахованих програмних рішень для аналізу параметрів імпульсів** може дати чудові результати під час вирішення складних вимірювальних завдань. Наприклад, функція RTSA може бути унікальним за ефективністю інструментом для налаштувань режимів запуску під час наступних вимірів, що виконуються за допомогою програмного забезпечення VSA або додатків для вимірювання параметрів імпульсних сигналів.

### ПРОЦЕС ТА ІНСТРУМЕНТИ АНАЛІЗУ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Процес аналізу імпульсних сигналів часто описується як сукупність трьох основних етапів: запуск, захоплення сигналу і його вимірювання або аналіз (див. рис. 3). Це стислий, зручний і корисний опис, проте етапи не завжди є незалежними та вибудовані в послідовності, показаній на рисунку.

**Запуск (triggering)** — це процедура ініціювання процесу синхронних (пов'язаних єдиною часовою шкалою) вимірювань, що починається з подачі умовного сигналу (імпульсу синхронізації) або в момент настання обумовленої події. Її необхідність пов'язана з тим, що досліджувані сигнали за визначенням є такими, що змінюються в часі. Для забезпечення синхронності може використовуватися зовнішнє джерело сигналів синхронізації (явний запуск) або обладнання, що входить до складу вимірювальної системи (умовний запуск). Для періодичних сигналів необхідна синхронізація за часом, яка також може полягати в простому виборі відповідного інтервалу часу вимірювань за допомогою функції часової селекції.

**Захоплення сигналу** може являти собою короткий (наприклад, один кадр) або тривалий запис, призначений для подальшої обробки. Запис може бути безперервним або сегментованим, коли деякі непотрібні дані відкидаються для підвищення ефективності використання доступної пам'яті. Смуга захоплення сигналу може бути обрана на ділянці спектра, зайнятій одним імпульсом, або на ширшій смузі для захоплення частини загального сигнального оточення, що містить у собі кілька різних імпульсів, а також інші сигнали.

**Процес вимірювань** може бути кадровим або включати процедуру постобробки, коли для проведення синхронного аналізу може бути виконано розподіл отриманих результатів за шкалою часу відносно загальної опорної

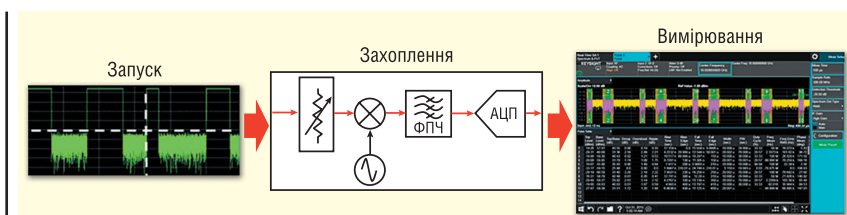


Рис. 3. Вимірювання сигналів, що змінюються в часі, часто описується як послідовність із трьох етапів



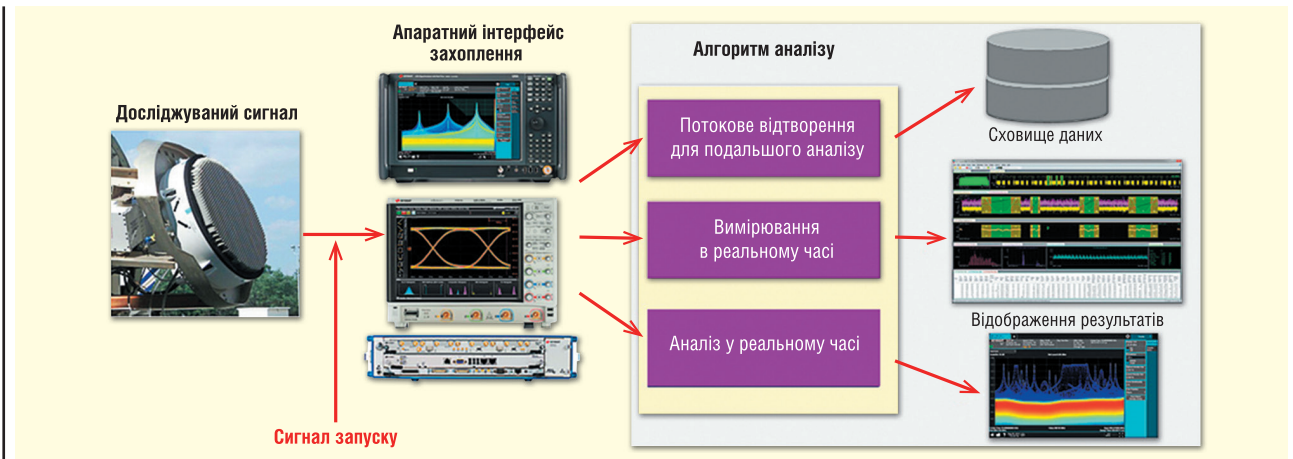


Рис. 4. Функціональні блоки процесу вимірювань параметрів імпульсів або сигнального середовища

точки відліку або певної події. У разі захоплення або запису сигналу з використанням ПЗ 89600 VSA центральну частоту і діапазон вимірювань можна змінити після закінчення часу захоплення.

Під час глибокого вивчення процесу вимірювань параметрів імпульсних сигналів, описаний вище перший крок може викликати додаткові труднощі: дані для забезпечення синхронності фактично можуть бути отримані під час наступних вимірювань/аналізу, наприклад, для запуску за частотною маскою (FMT) під час аналізу спектра в реальному часі. Це може надати всьому процесу вимірювань рекурсивного характеру, як описано нижче.

### ФУНКЦІОНАЛЬНІ БЛОКИ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Етапи в описаному вище процесі можуть виконуватися окремо різними пристроями або одним аналізатором у кілька етапів, включно з вимірюванням усіх параметрів імпульсів. Узагальнене схематичне представлення процесу показано на рисунку 4. Оскільки результатом захоплення сигналу є набір цифрових вибірок, сигнал може бути поміщений у сховище даних для подальшого (або повторного) оброблення різними способами.

Апаратні засоби захоплення сигналу можуть бути реалізовані за принципом оцифрування сигналів в основній смузі частот або на ПЧ, і виконані в окремому корпусі або у вигляді модульних систем. Найважливішими характеристиками апаратних засобів є смуга пропускання і динамічний діапазон, хоча також важливими є глибина пам'я-

ті, кількість каналів та інші фактори, які більш детально описані нижче.

Алгоритми аналізу перетворюють оцифровані сигнали на вимірювальні дані, що відображаються на екрані у вигляді графіків і таблиць з отриманими результатами. Ці алгоритми можуть бути частиною загального набору інструментів векторного аналізу сигналів або спектра, а також можуть бути інтегровані в пакети вимірювальних додатків для аналізу параметрів імпульсів. Такі додатки особливо ефективні, коли необхідний складніший аналіз параметрів імпульсів, наприклад статистичний аналіз або визначення характеристик сигнального середовища.

Великий обсяг пам'яті має важливе значення у випадках, коли необхідно аналізувати велику кількість суміжних імпульсних сигналів з масиву даних, захоплених без пропусків, або коли доступ до досліджуваного сигналу обмежений, і аналіз буде проводитися пізніше. Сховище захоплених даних використовується при подальшій обробці для отримання необхідних результатів аналізу і може також використовуватися для відтворення сигналу.

Операції запуску можуть ініціювати або синхронізувати процес вимірювань параметрів імпульсного сигналу або можуть використовуватися для прив'яз-

ки наявних вибірок до єдиної шкали часу під час аналізу імпульсів. Оскільки запуск може бути ініційовано безпосередньо за вхідним сигналом або організовано в процесі його опрацювання, наприклад, аналізу в реальному часі або постобробки даних зі сховища, синхронізація може бути частиною будь-якого з основних функціональних блоків процесу вимірювань, показаних на рисунку 4.

### СКЛАДНОЩІ, ЩО ВИНИКАЮТЬ У ПРОЦЕСІ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Знаходження сигналу, що цікавить, і прив'язка вимірювань до єдиної часової шкали — це перші кроки під час аналізу імпульсних сигналів, які можуть бути і найскладнішими. Це особливо справедливо в умовах складного сигнального середовища, яке може бути зумовлене наявністю джерел випромінювань з частотою і амплітудою, що швидко змінюються, а також численних джерел сигналів з широким розкидом амплітуд.

### Запуск за амплітудою сигналу ПЧ у ПЗ 89600 VSA є найефективнішим і найшвидшим способом запуску для ВЧ-/НВЧ-імпульсів

Одним із найбільш корисних і простих у використанні способів запуску є

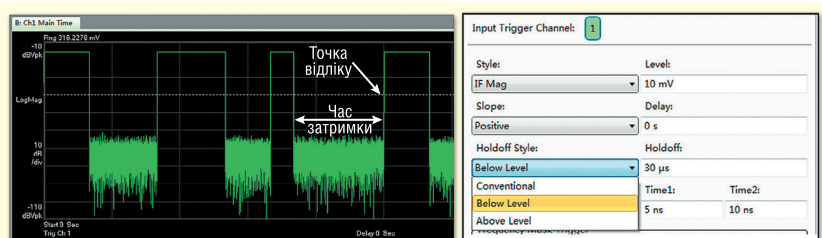


Рис. 5. Запуск за амплітудою сигналу ПЧ у ПЗ 89600 VSA є найефективнішим і найшвидшим способом запуску для ВЧ-/НВЧ-імпульсів

запуск за амплітудою сигналу ПЧ (IF magnitude trigger) у реальному часі. Більшість апаратних інтерфейсів компанії Keysight ВЧ-діапазону, що використовують ПЗ 89600 VSA, містять у собі спеціальні апаратні або програмні засоби для виконання в реальному часі розрахунків повної амплітуди сигналу в обраному діапазоні частот або смугі ПЧ. ПЗ VSA використовує результати цих обчислень для організації режиму запуску за амплітудою з регульованою затримкою, пороговим рівнем і часом утримання, як показано на рисунку 5. Використовуючи функції утримання і негативної затримки запуску (попереднього запуску), сигнали можна легко виміряти до безпосереднього настання події запуску.

Такий підхід не робить частотну вибірковість вже заданої смуги огляду аналізатора, а можливість задати параметри часу і порога спрацювання для режиму запуску за амплітудою на ПЧ забезпечують достатню гнучкість для врахування специфіки багатьох імпульсних вимірювань. Комбінуючи позитивні та негативні (завчасний запуск) затримки з відповідними значеннями і типами утримання (див. рис. 5), серед інших можна виділити одиничний імпульс. Якщо присутня періодично повторювана послідовність, то для запуску можна використати її найбільший за амплітудою сигнал, а позитивні або від'ємні часові затримки допоможуть вибрати будь-який інший одиничний імпульс або часовий інтервал. Функцію утримання також можна використовувати для виключення помилкових запусків через коливання амплітуди імпульсу внаслідок модуляції.

Такий запуск за амплітудою доступний у ПЗ VSA як для вимірювань у реаль-

ному часі, так і для відтворення записів сигналів. Основним недоліком цього методу є вимірювання низькорівневих сигналів у тій самій смузі частот огляду, що й потужніших, де слабші сигнали не мають відомої або стабільної прив'язки в часі до потужніших, які використовують для запуску за амплітудою сигналу ПЧ.

**Запуск за частотною маскою**

Швидкість цифрового опрацювання сигналів збільшилася до такої міри, що розрахунок спектральних характеристик (хоч і з деякими обмеженнями) в аналізаторах сигналів серій UXA і PXA може виконуватися в реальному часі зі смугою пропускання до 510 МГц. Після цього результати обробки можна перевірити з використанням низки обмежувальних лімітів або маски, що є надзвичайно ефективним способом частотно-вибіркового запуску (див. рис. 6). Це дає змогу організувати запуск з урахуванням особливостей спектра вхідного сигналу. Функціональність цього способу запуску доповнюється гнучкими критеріями вибору необхідної поведінки сигналу.

Запуск за частотною маскою (FMT) особливо корисний під час пошуку та вимірювання параметрів короткочасних або завадостійких сигналів, а також у захопленні сигналів із певною поведінкою, яку можна якнайкраще розпізнати в частотній ділянці. Обробка із запуском за частотною маскою здійснюється в реальному часі або після захоплення без пропусків і гарантує, що будь-який сигнал або перебудова сигналу, що відповідає критеріям запуску, ініціює запуск процесу вимірювань або початок відліку часу.

Частотні маски можна формувати вручну або на основі результатів ви-

мірювань зразкових параметрів спектра, вводячи зміщення або редагуючи контрольні точки амплітуди/частоти. Гнучкий вибір критеріїв запуску робить запуск за частотною маскою вкрай ефективним інструментом для виявлення певної зміни сигналу або певної події в загальному сигнальному оточенні (див. праву частину рис. 6). Запуск можна ініціювати під час «входу» або «виходу» сигналу з маски і навіть для складнішої поведінки, наприклад, під час покидання маски після події входу. Ці логічні критерії запуску можуть бути корисними для захоплення сигналів, які перемикаються між каналами або використовують методи псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ).

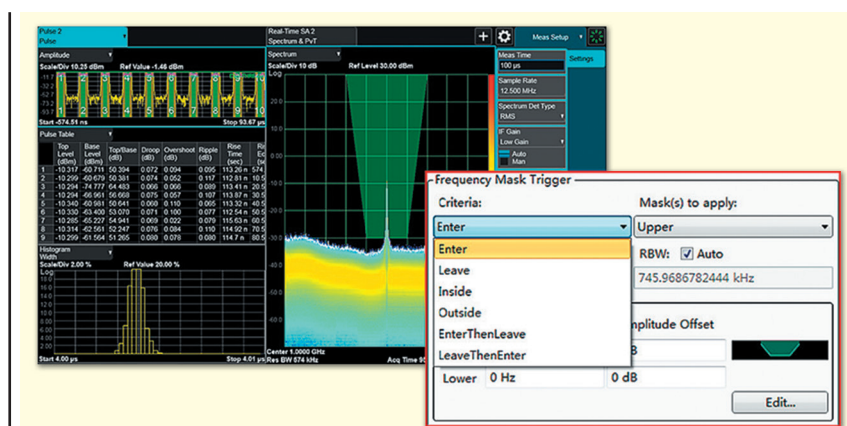
Функція запуску за частотною маскою може використовуватися спільно з додатком для вимірювань параметрів імпульсних сигналів аналізаторів серії X. Таке об'єднання двох інструментів обробки сигналів дасть змогу ефективно виявляти й аналізувати імпульсні сигнали, які задовольняють специфічним критеріям за частотою, амплітудою та поведінкою.

У поєднанні з ПЗ 89600 VSA запуск за частотною маскою в реальному часі можна використовувати для того, щоб ініціювати початок відліку часу при виконанні безперервного запису сигналу для подальшої обробки. Тоді як запуск за частотною маскою працює тільки в частотній ділянці, записи сигналів можна здійснювати в частотній і часовій ділянці, а також за параметрами модуляції. Записи містять інформацію про часову синхронізацію захоплення даних, що дає змогу повністю схарактеризувати різні елементи сигнального середовища і встановити будь-які взаємозв'язки між різними областями аналізу.

**Запуск за часовими параметрами**

Описані вище методи запуску і засоби обробки сигналів задовольняють більшість потреб у вимірюванні параметрів імпульсів. Тривалість і коефіцієнт заповнення імпульсів є важливими змінними в деяких сигналах, і запуск із селекцією за часовими параметрами (TQT) може допомогти виділити їх для вимірювання.

Тригер із поділом за часом доповнює методи запуску за частотною маскою та амплітудою сигналу ПЧ і дає змогу безперервно відстежувати тривалість подій у смузі захоплення. Таким чином, TQT встановлює часовий параметр на додаток до вже наявних пара-



**Рис. 6.** Під час запуску за частотною маскою виконується порівняння результатів аналізу спектра в реальному часі із заданим користувачем амплітудним/частотним шаблоном

метрів амплітуди або спектра. Тимчасові критерії та приклади подій показано на рисунку 7. Всупереч тому, що критерії можуть бути дотримані тільки після появи досліджуваного сигналу, виміряти його параметри дасть змогу негативна затримка запуску (попередній запуск).

З TQT пов'язані три параметри: «Час 1», «Час 2» і «Часові критерії». Ці параметри дають змогу задати як відкриті, так і закриті часові інтервали.

Під час використання TQT захоплення відліків для аналізу здійснюється після того, як подія спостерігалася протягом зазначеного часу. Якщо потрібен аналіз попередніх подій, можна використовувати від'ємну затримку, яка зрушить момент початку захоплення сигналу в негативну точку часової шкали (до настання події запуску). Спрощений приклад застосування TQT показано на рисунку 8, де два сигнали накладаються один на одного в частотній області. Ці сигнали розділяються, виходячи з відмінностей у тривалості імпульсів.

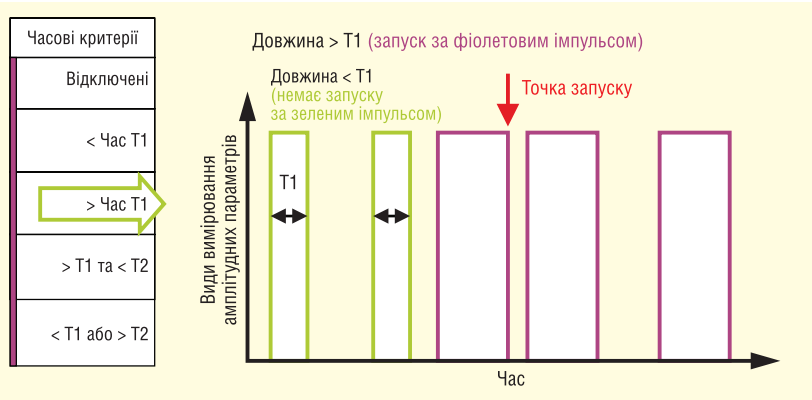
Два сигнали в цьому прикладі можна розділити, виходячи з їхньої повної потужності або форми спектра, однак на практиці під час роботи з сигналами, амплітуда яких постійно змінюється, форма імпульсу може бути надійнішою відмінною ознакою досліджуваних сигналів.

### Затримка запуску в осцилографіях

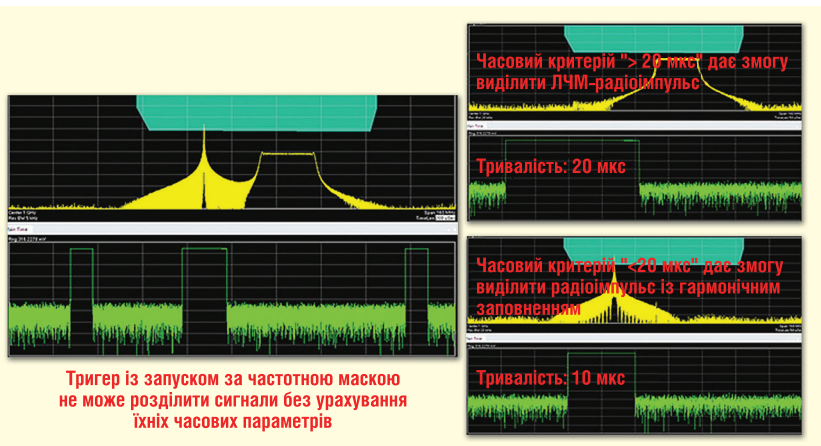
Оскільки осцилографи працюють за принципом оцифрування сигналу в основній смузі частот, у них зазвичай не застосовують складних сполучень описаних вище методів запуску з використанням часової та частотної областей. Однак вони пропонують можливості запуску, які можуть бути корисними під час роботи з ВЧ імпульсними сигналами.

Одним із прикладів є простий запуск за фронтом у поєднанні із затримкою запуску. Запуск відбувається, коли рівень вхідного сигналу перевищує граничне значення напруги, як і відбувається при появі ВЧ-імпульсу в міру зростання його амплітуди. Якщо задати час затримки, що перевищує тривалість найдовшого очікуваного імпульсу, то така затримка гарантує, що запуск буде проводитися тільки на початку ВЧ-імпульсів. Найбільш передбачувано цей метод працює щодо імпульсних сигналів з постійною тривалістю.

Під час використання ПЗ 89600 VSA спільно з осцилографами та іншими пристроями, що працюють за принципом оцифрування сигналу в основній смузі частот, також можна реалізувати



**Рис. 7.** Запуск за часовими параметрами відбувається в разі дотримання одного або двох часових критеріїв



**Рис. 8.** Запуск за часовими параметрами дає змогу розділити два імпульсні сигнали, спектри яких частково накладаються один на одного

вибірковий запуск за частотою й амплітудою ВЧ-сигналу. Це двоетапний процес, під час якого відліки сигналу спочатку захоплюються в режимі вільного запуску без пропусків з використанням функції захоплення впродовж заданого часу цього ПЗ. А потім за допомогою ПЗ 89600 VSA під час постобробки сигнал відтворюється з моменту настання події запуску, як описано вище.

### КОМПРОМІС МІЖ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ І СМУГОЮ ЧАСТОТ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

Широкі та надширокі смуги пропускання відіграють дедалі важливішу роль під час роботи з імпульсними сигналами з низки причин:

- надширокопasmові радіолокатори забезпечують високу роздільну здатність за дальністю, а також підвищену стійкість до виявлення і впливу навмисних перешкод;
- передавачі з ППРЧ працюють у широкому діапазоні частот, а отже,

щоб повністю схарактеризувати сигнал і уникнути пропуску задіяних частотних каналів, потрібно виконати захоплення сигналу в широкій смузі; системи радіотехнічної розвідки (PTR) для виявлення цілей вимагають збору даних у широкій, безперервній смузі частот.

Оцифрування сигналів у широкій смузі частот, за своєю суттю, накладає певні обмеження на характеристики, хоча з часом ситуація, пов'язана з компромісами, на які доводиться при цьому йти, поліпшується. Ці обмеження в основному пов'язані зі збільшенням рівня шумів при розширенні смуги пропускання і зменшенням ефективних розрядів АЦП у міру збільшення частоти дискретизації. Їх необхідно зіставити з вимогами до таких характеристик, як динамічний діапазон, чутливість, нелінійні спотворення, похибка вимірювань амплітуди і фазовий шум.

Як було описано раніше, основними інструментами обробки під час аналізу імпульсних ВЧ-/НВЧ-сигналів є аналізатори сигналів та осцилографи в поєднанні з програмою векторного аналізу

сигналі 89600 VSA або додатком для вимірювань параметрів імпульсів, що працює на аналізаторах сигналів серії X. Найпродуктивнішими з них є аналізатор сигналів UXA та осцилографи серії S (див. рис. 2). Надамо коротке порівняння їхніх характеристик.

**Аналізатор сигналів UXA: смуга пропускання 1 ГГц (12 біт), 510 МГц (14 біт)**

**Переваги:**

- найкращий динамічний діапазон, чутливість, точність і динамічний діапазон, вільний від паразитних складових (SFDR) — 78 дБ за 14-розрядного АЦП;
- повнофункціональний високопродуктивний аналіз спектра;
- можливість використання програми для вимірювання параметрів імпульсів N9067C;
- охоплення сигналів сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль.

**Недоліки:**

- ширина смуги пропускання обмежена — 1 ГГц (UXA) або 510 МГц (PXA).

**Осцилографи серії S: смуга пропускання — 8 ГГц (10 біт)**

**Переваги:**

- найширша смуга захоплення/аналізу;
- нижча вартість, ніж у високопродуктивних аналізаторів сигналів;
- сегментація пам'яті для аналізу великої кількості імпульсних сигналів.

**Недоліки:**

- обмежений динамічний діапазон (проте чудовий для осцилографа);
- необхідність виконання перетворення частоти зі зниженням і фільтрації під час вибірки в основній смузі частот сигналу з використанням ПЗ VSA;
- продуктивність вимірювань може знижуватися під час використання високої роздільної здатності за частотою і під час роботи з тривалими часовими інтервалами або великими масивами захоплених даних.

Альтернативним рішенням є використання аналізатора ВЧ-/СВЧ-сигналів, такого як Keysight серії PXA, як перетворювача з пониженням частоти в поєднанні з відповідним осцилографом для цифрування сигналу ПЧ аналізатора. Характеристики такої вимірювальної системи будуть аналогічні характеристикам осцилографа, який має діапазон робочих частот, що відповідає обраному типу аналізатора сигналів. За такої конфігурації можна отримати смугу аналізу понад 1 ГГц, забезпечивши в такий спосіб економічне рішення для вимірювальних завдань, які потребують смуги пропускання понад 500 МГц та/або охоплення сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль. Як зазначалося раніше, аналізатор сигналів серії UXA безпосередньо забезпечує смугу пропускання до 1 ГГц на частотах до 50 ГГц і вище (у разі використання моделі N9041B).

**ЗАХОПЛЕННЯ ВЕЛИКОЇ КІЛЬКОСТІ ІМПУЛЬСІВ З ЕФЕКТИВНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ПАМ'ЯТІ**

Довжина масиву або обсяг даних, які мають бути отримані для проведення вимірювань, є важливим аспектом під час розв'язання більшості прикладних задач аналізу імпульсних сигналів. З погляду часових показників довжина масиву даних особливо важлива під час аналізу динамічного сигнального середовища, коли необхідно забезпечити захоплення сегмента, тривалість якого є достатньою для відображення динаміки, що розглядається. Кожна апаратна платформа має обмежену глибину пам'яті, і її ефективне використання забезпечить збір максимального обсягу даних і найкращі з можливих для цієї платформи результати вимірювань параметрів сигналу.

Для систем із дискретизацією даних максимальна довжина масиву захоплен-

них даних для заданого обсягу пам'яті є лінійною функцією смуги захоплення даних. Ця обставина дає аналізатору сигналів перевагу перед осцилографом, оскільки аналізатор сигналів оцифровує тільки смугу ПЧ. Осцилограф же повинен оцифрувати весь спектр сигналу в основній смузі частот з подальшим скороченням обсягу даних для перенесення на обмежену смугу ПЧ. Результатом є набагато коротший інтервал безперервного захоплення сигналу. Як зазначалося раніше, передача й обробка даних, захоплених в основній смузі частот, також може призводити до зниження продуктивності під час виконання вимірювань.

Під час оцифрування широкосмугових сигналів з малим коефіцієнтом заповнення в основній смузі частот нестача пам'яті може стати проблемою. Аналізатори сигналів виконують оцифрування вузких смуг ПЧ, а не всієї смуги частот, тому захоплені ними масиви даних можуть містити набагато більше імпульсів, ніж осцилографи, які використовують всю доступну пам'ять. У таблиці 1 наведено порівняння варіантів безперервного захоплення сигналу із лінійною частотною модуляцією.

У багатьох випадках для розв'язання цієї проблеми використовується функція сегментування пам'яті, що застосовується в деяких осцилографах. Коли цю функцію ввімкнено, пам'ять осцилографа, призначена для захоплення сигналів, розбивається на безліч маленьких сегментів рівної довжини. Довжину сегмента пам'яті вибирають дещо більшою, ніж потрібно для захоплення найширшого з розглянутих імпульсів.

У наведеному вище прикладі використання тих самих параметрів дискретизації та вибір довжини сегмента 1.2 мкс у пам'яті осцилографа дають змогу виконати захоплення понад 16 000 імпульсів, що, в принципі, відповідає можливостям UXA. Такий підхід не забезпечує безперервного

**Таблиця 1. Порівняння варіантів безперервного захоплення сигналу, смуга частот 500 МГц, тривалість імпульсу 1 мкс, період повторення імпульсів 50 мкс**

Довжина масиву даних					
Аналізатор сигналів серії UXA			Осцилограф серії S		
Переносить спектр сигналу на ПЧ і оцифровує	Частота дискретизації	500 Мвиб/с × 1.28 = 640 Мвиб/с	Оцифровує сигнал безпосередньо на ВЧ (в основній смузі)	Частота дискретизації	20 Гвиб/с
	Глибина пам'яті:	536 Мвиб		Глибина пам'яті	500 Мвиб використовується в ПЗ VSA
	Максимальна тривалість захопленого сигналу	536 Мвиб/640 Мвиб/с = 0.8375 с		Максимальна тривалість захопленого сигналу	500 Мвиб/20 Гвиб/с = 0.025 с
Кількість захоплених імпульсів		10.8375 с/50 мкс = 16 750 імпульсів	Кількість захоплених імпульсів		0.025 с/50 мкс = 500 імпульсів



захоплення, однак відкинуті дані не містять корисної інформації, а пам'ять використовується набагато ефективніше, ніж без сегментування.

Сегментування пам'яті також значно полегшує відтворення та перегляд захоплених імпульсів у часовій області за допомогою осцилографа. Щоб розібратися в послідовності імпульсів перед обробкою сегментів пам'яті за допомогою програмного забезпечення, такого як 89600 VSA, користувач може перемикатися між сегментами вручну або автоматично.

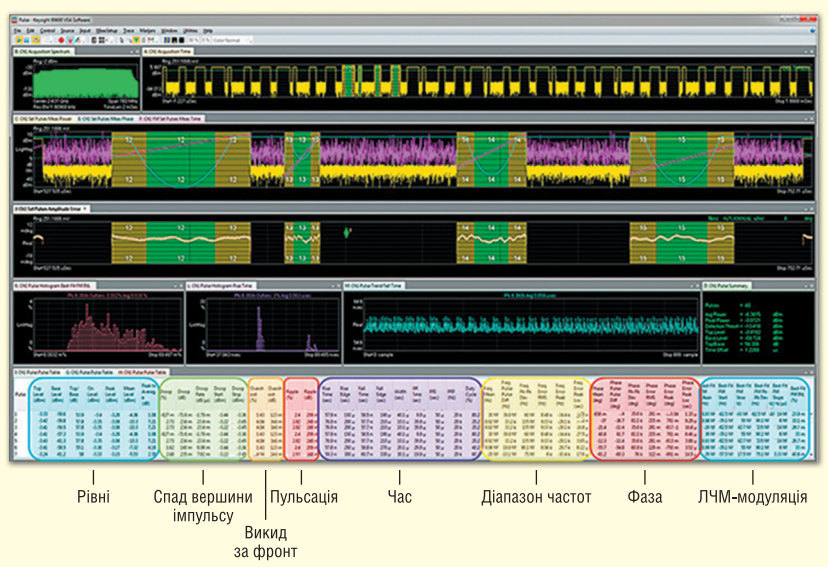
### ВСЕБІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Поєднання аналізу в часовій області за допомогою осцилографа, аналізу спектра в реальному часі за допомогою аналізатора сигналів і програми векторного аналізу сигналів VSA, що дає змогу проводити складні вимірювання на обох платформах, відповідає вимогам безлічі завдань з аналізу імпульсних сигналів. Однак у деяких випадках потрібні ще більш масштабні можливості, які дадуть змогу збирати інформацію про сотні або тисячі імпульсів і представляти результати аналізу в табличній або графічній формі. Нижче наведено такі випадки:

- дослідження параметрів передавачів і компонентів радіотехнічних систем;
- оцінка стабільності імпульсної модуляції;
- визначення характеристик загроз (SIGINT);
- перевірка на виявлення змодельованих загроз;
- перевірка реакції на постановку навмисних перешкод.

Результати всебічних вимірювань параметрів імпульсних сигналів найчастіше набувають форми низки графічних залежностей у кількох вікнах на екрані та таблиць, як показано на рисунку 9. На цій складеній екранній формі, створеній за допомогою опції VHQ для ПЗ 89600 VSA, відображено одразу кілька різних характеристик великої групи імпульсів. Такий різнобічний погляд на результати вимірювань параметрів імпульсів у часі є потужним інструментом контролю, а також виявлення та усунення неполадок.

Розуміння і кількісна оцінка стабільності та повторюваності безлічі характеристик імпульсних сигналів є критично



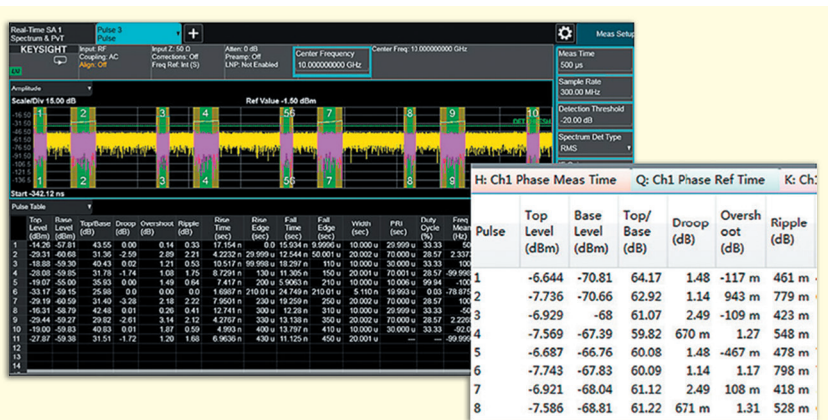
**Рис. 9. Результати вимірювань одразу кількох різних характеристик великої групи імпульсів**

важливими завданнями. Ці програмні рішення для аналізу пропонують такі можливості:

- вимірювання всіх значущих параметрів, включно з тривалістю імпульсу, періодом повторення імпульсів, часом наростання і спаду фронтів імпульсів, падінням потужності впродовж імпульсу і характеристиками модуляції, такими як внутрішньоімпульсна частотна і фазова модуляція;
- надання статистичної інформації про параметри, включно з гістограмами та трендами, з точним узагальненням поведінки великої кількості імпульсів. Крім того, опція VHQ для ПЗ VSA підтримує роботу із зовнішніми інтерфейсними модулями та цифровими осцилографами для захоплення ВЧ-/НВЧ-сигналів, а також функцію сегментованої пам'яті.

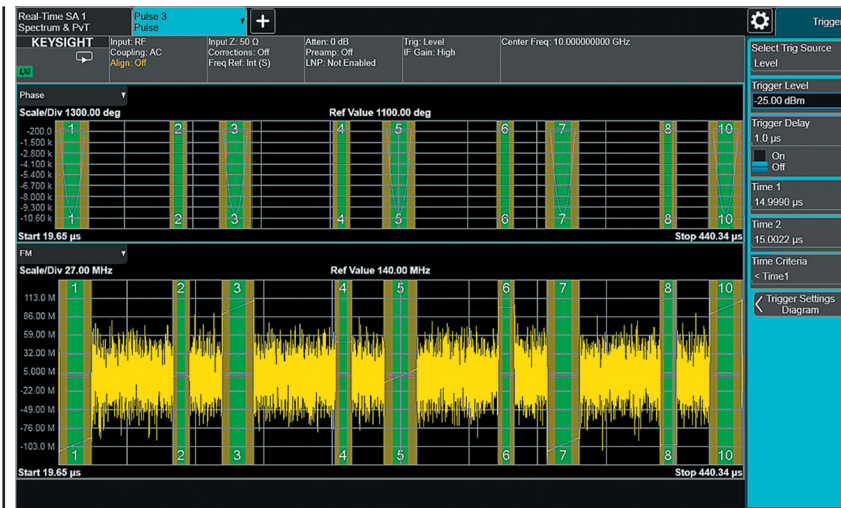
Сукупний аналіз великої кількості імпульсів дає змогу виявити поведінку, яку іншими способами виявити або оцінити кількісно важко. Зосередивши зусилля на аналізі амплітудних параметрів, як-от максимальна/базова потужність, спад вершини імпульсу, викид на фронті імпульсу і нерівномірність, можна отримати результати, подібні до показаних на рисунку 10.

Зрозуміло, для роботи з імпульсною модуляцією необхідне розуміння параметрів сигналу в часовій області, таких як тривалість імпульсу, коефіцієнт заповнення і час наростання/спаду фронту. Після того як користувач визначить діапазон дійсних значень тривалості імпульсів і часу наростання/спаду фронту, функції аналізу імпульсних сигналів у вимірювальному застосунку серії X або ПЗ 89600 VSA з опцією VHQ можуть ав



**Рис. 10. Графічне представлення результатів захоплення імпульсів (ліворуч) і амплітудні або енергетичні параметри імпульсів у вигляді зведеної таблиці (праворуч)**





**Рис. 11.** Результати роботи спеціальних додатків для вимірювання параметрів імпульсів

передавача порівняно з вимірюваннями окремих імпульсів.

**ВИСНОВОК**

Зростання якісних показників та ефективності сигналів, які використовуються в системах радіолокації та РЕБ, супроводжується розширенням можливостей цифрового оброблення сигналів і появою вимірвальних застосунків у поєднанні з новими апаратними засобами для захоплення ВЧ-/НВЧ-сигналів. Ці нові апаратні засоби забезпечують значне розширення можливостей аналізу в поєднанні з розширенням смуги пропускання і динамічного діапазону. Це стосується як аналізаторів сигналів, так і осцилографів.

Запуск за частотною маскою, запуск за часовими параметрами та аналіз спектра в реальному часі можна використовувати з новітніми апаратними інтерфейсами для збирання даних, забезпечуючи впевнене вилучення досліджуваних сигналів в умовах найскладнішого сигнального оточення.

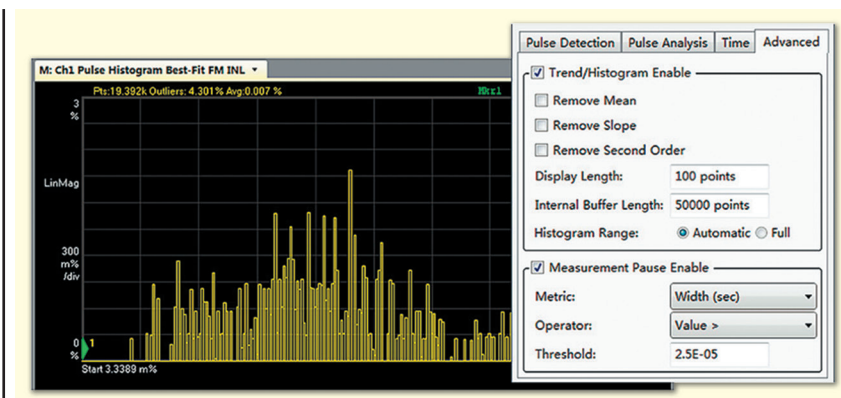
Новий вимірвальний додаток серії X, що працює на аналізаторах сигналів, доповнює програму векторного аналізу сигналів 89600 VSA з опцією BHQ, забезпечуючи найточніші та найповніші виміри параметрів складних модульованих сигналів і сигнального середовища. Ці рішення дозволяють проводити автоматизовані вимірювання великої кількості імпульсів і узагальнюють отримані результати, формуючи виразну статистику поведінки сигналів.

Максимальна смуга пропускання для аналізу в 1 ГГц, охоплення смуги частот до 50 ГГц і вище та підтримка зовнішніх широкосмужових змішувачів для розширення діапазону частот аналізатора сигналів UXA у поєднанні з застосунком N9067C надають широкі можливості для вимірювання параметрів імпульсів із використанням одного приладу з єдиним призначенням для користувача інтерфейсом.

**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**

СН



**Рис. 12.** Відображення зведених характеристики безлічі імпульсних сигналів на одному графіку

томатично синхронізувати імпульси та відображати параметри часової області у вигляді таблиці. Імпульси можна впорядкувати за будь-яким параметром, наприклад, за тривалістю.

Базова версія ПЗ 89600 VSA дає змогу вимірювати частоту/фазу окремих імпульсів, водночас спеціальні додатки для вимірювання параметрів імпульсів можуть оптимізувати цей процес завдяки груповому опрацюванню, автоматично ідентифікуючи імпульси та накладаючи результати одночасних вимірювань з узгодженням за часом, як показано на рисунку 11. Вони дають змогу одночасно вимірювати низку параметрів кількох імпульсних сигналів і відображають результати вимірювань разом з автоматично виявленими та пронумерованими імпульсами. Формат відображення з накладенням може бути корисний під час пошуку та усунення неполадок.

Такі узгоджені в часі вимірювання параметрів імпульсної модуляції особливо корисні для діагностики проблем,

також дане ПЗ може використовувати методи оптимального наближення та апроксимації для побудови зведених таблиць параметрів, таких як обвідна ЧМ-сигналу і дев'яція частоти.

За великої кількості вимірюваних імпульсів застосунок може використовувати отримані на підставі аналізу цих імпульсів статистичні дані для створення гістограм і графіків, як показано на рисунку 12. Гістограма, що відображає зведені характеристики безлічі імпульсних сигналів на одному графіку і призначена для застосування методів оптимального наближення та апроксимації з метою визначення деяких параметрів ЧМ-сигналу. Це узагальнене уявлення об'єднує накопичену за деякий час інформацію і є прекрасним інструментом для виявлення тенденцій і побудови трендів.

За одним або кількома сеансами захоплення сигналів може бути зібрано статистику, яка забезпечує набагато більшу чутливість до дефектів і дає повніше уявлення про характеристики