

УДК 621.396

С.В. Герасимов¹, А.О. Подорожняк², О.П. Рачинський³¹ Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків³ Центр контролю космічного простору, Євпаторія

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕКТОРНИХ АНАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗА ЧАСТОТНИМ РОЗПОДІЛЕННЯМ РАДІОСИГНАЛІВ

В статті показано значення та роль контролю за частотним розподіленням радіосигналів за допомогою спектрального аналізу. Обґрунтовані основні завдання, які спроможні вирішувати сучасні векторні аналізатори спектру, їх особливості, переваги над традиційними приладами, які використовуються для дослідження параметрів радіосигналів. Запропоновані пропозиції та обґрунтовані заходи щодо здійснення контролю за частотним розподіленням радіосигналів.

Ключові слова: частотне розподілення, радіосигнал, спектральний аналіз, векторні аналізатори

Введение

Постановка проблеми. На сучасному етапі світового розвитку новітніх технологій спостерігається інтенсивний процес освоєння частотного спектру в області понадвисоких частот (ПВЧ), тобто діапазонів хвиль від одиниць до сотень ГГц. Широке використання спектру ПВЧ спостерігається як у побуті (наприклад, в мікрохвильових печах, системах стільникового та супутникового зв'язку, системах бездротової передачі даних – Wi-Fi, Wi-MAX і Bluetooth, та сучасних телекомунікаційних мережах), так і в приладах спеціального призначення. Для останніх, наприклад, достатньо звернути увагу на системи управління космічними апаратами, радіолокації, забезпечення супроводу та посадки літаків, системи глобального позиціонування та навігації, системи радіочастотної ідентифікації, пристрої для прослуховування та приладдя для їх подавлення тощо. Стрімко розвиваються скриті системи зв'язку з понадширокосмуговими та шумоподібними ПВЧ-сигналами, які мають складний спектр, що змінюється у часі [1–4].

За допомогою мікрохвильової зброї можна порушувати роботу будь-яких електронних систем. Перспективні магнетрони та клістриони потужністю до 1 ГВт з використанням антен з фазованими ґратами дозволяють порушувати функціонування аеродромів, стартових позицій ракет, центрів і пунктів управління, виводити з ладу системи управління військами і зброєю.

Вже сьогодні існують суттєві проблеми щодо критичності та аналізу сигналів сучасних цифрових мереж зв'язку, які використовують часове та кодове розділення каналів, псевдовипадкове перестроювання частоти, багатопозиційну амплітудно-фазову модуляцію.

Неменше важлива складова використання радіосигналів у військах – це ведення космічної розвідки та радіоелектронна боротьба (РЕБ). Ці галузі військового

застосування радіосигналів мають великі перспективи, бо можуть значно змінити розподіл сил при можливому конфлікті. Так, наприклад, перша в світовій історії спроба ведення РЕБ була успішно зроблена під час війни з Японією командувачем Тихоокеанської ескадрою віце-адміралом С.О. Макаровим 15 квітня 1904 року. Тоді вдалося дезорганізувати радіоперешкодами канали управління вогнем артилерії японських кораблів і успішно відбити ворожий удар [3]. Крім того, з середини 1990-х років війська РЕБ зіткнулися з необхідністю не лише, як і раніше, забезпечувати функціонування станцій РЕБ, що діють, але і налагоджувати взаємодію з радіочастотними каналами пострадянських держав, домовлятися про координацію використання радіочастотного спектру з НАТО і країнами Західної Європи, визначити новий порядок використання радіочастотного спектру радіоелектронних станцій різного призначення. Також, слід відмітити, що з прийняттям на озброєння армій протиборчих сторін таких засобів як потужні мобільні мікрохвильові генератори всіх видів базування, з'явиться можливість блокувати системи зброї протиборчої сторони. Це висуває мікрохвильові засоби в розряд найбільш пріоритетних озброєнь майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз літератури показав [1–4], що існує низка поглядів на застосування аналізаторів спектру у сфері контролю за частотним розподіленням радіосигналів. Однак вони не розглядають можливостей використання сучасної цифрової техніки, до якої можна віднести векторні аналізатори [4–8]. Крім того, спостерігається тенденція використання у сфері оборони передових країн світу найбільш пріоритетного озброєння майбутнього – радіочастотної зброї.

Таким чином, актуальності набуває питання, пов'язане з зростанням значення проведення всебічного контролю за частотним розподіленням радіосигналів, в тому числі у військових цілях, щодо по-

передження можливих ускладнень в роботі безлічі систем радіоелектронного обладнання.

Метою статті є обґрунтування пропозицій щодо використання сучасних векторних аналізаторів сигналів для контролю частотних параметрів радіосигналів, які використовуються в спеціальних цілях – військовими та космічними підрозділами.

Основна частина

Аналіз параметрів радіосигналів разом з їх виявленням складає одну з основних операцій радіоконтролю. В процесі аналізу оператор або комп'ютерна програма вимірюють характеристики виявленого радіосигналу, що досліджується, такі як несуча частота, рівень, форма та ширина спектру, параметри модуляції тощо. Результати цих вимірювань використовуються для перевірки відповідності параметрів контрольованих систем встановленим нормам або служать початковими даними для процедур класифікації та ідентифікації сигналів і радіосистем, в яких ці сигнали використовуються.

Щоб отримати детальну інформацію про сигнали, що приймаються, необхідно досліджувати їх поведінку в часі та виконати спектральний аналіз у частотній області. Якщо виявлений сигнал модульований, потрібно визначити вид модуляції й оцінити часові та частотні параметри модулюючих процесів.

Останнім часом у зв'язку з інтенсивним розвитком систем рухомого та супутникового радіозв'язку й широким впровадженням перспективних цифрових методів модуляції та розділення каналів вимоги до апаратури аналізу сигналів істотно змінилися. На зміну послідовним аналізаторам спектру й панорамним приймачам сигналів з простими АМ- і ЧМ-демодуляторами приходять нові прилади, здатні ефективно працювати відразу в трьох областях представлення радіосигналів: часовою, частотною та в області модулюючих процесів.

Безпроводні пристрої зв'язку нині знайшли ширше застосування. Так, малопотужні пристрої цього типу, такі як Bluetooth або Wi-Fi, вбудовуються в стільникові телефони, ноутбуки, принтери, сканери та інші численні пристрої. Вони використовують багаточастотні ПВЧ-сигнали із складними видами модуляції та часто працюють короткий час. Іноді аналізатор спектру реального часу виявляється єдиним пристроєм, що дозволяє захопити й розпізнати сигнали таких пристроїв і оцінити правильність їх роботи. Він особливо гостро необхідний при розробці та налаштуванні таких і подібних ним пристроїв.

Для виявлення будь-якого радіосигналу досить знати його несучу частоту та двокомпонентний векторний процес – комплексну огинаючу. Не дивлячись на те, що несуча частота може бути дуже великою, а комплексна огинаюча залишається відносно низькочастотним сигналом, результуючий сигнал можна перетворити в цифрову форму. Одна з мож-

ливих схем – це векторний аналіз радіосигналів.

Визначимо основні особливості, що виділяють векторні аналізатори серед традиційних приладів для досліджень параметрів радіосигналів [1, 3, 8–10]:

- на відміну від вимірювачів, які оперують з скалярними (одновимірними) процесами, векторний аналізатор обробляє ті комплексні огинаючі, які представляють амплітуду та фазу радіосигналу. Це дозволяє досліджувати амплітудні й фазові спектри, а також одночасно виділяти амплітуду, фазу та частоту радіосигналу і відобразити їх значення у вигляді спектральних, часових або векторних діаграм;

- завдяки цифровій реєстрації векторний аналізатор виконує паралельний аналіз спектру в реальному часі без втрат інформації, характерних для послідовних аналізаторів спектру, а також представляє вхідний радіосигнал одночасно в часовій і частотній області;

- цифрова реєстрація та зберігання в пам'яті наступних одна за одною реалізацій радіосигналу надає унікальні можливості у частині виявлення та дослідження характеристик нестационарних, імпульсних і одноразових радіосигналів в режимі спектрального аналізу із “часовою селекцією”.

Один з основних параметрів векторного аналізатора – це смуга частот паралельної обробки, яка залежить від швидкодії аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і продуктивності цифрового процесору (ЦП). Для дослідження та демодуляції сигналів високошвидкісних радіоінтерфейсів і сигналів з розширенням спектру потрібні смуги паралельного аналізу близько декількох МГц. Разом з тим, розширення смуги паралельного аналізу та застосування АЦП з високою частотою дискретизації може негативно вплинути на динамічний діапазон і частотну здатність аналізатора. Смуга частот при обробці у реальному часі відображає здатність приладу аналізувати безперервні стаціонарні сигнали у реальному часі. У ширококутових аналізаторів ця смуга може бути істотно менше смуги паралельної обробки. Тривалість реєстрованих реалізацій пов'язана тільки з об'ємом пам'яті ЦП і визначає можливості приладу з реєстрації та виявлення імпульсних і поодиноких сигналів.

Решта параметрів аналізатора: робочий діапазон частот, чутливість, діапазон вимірюваних рівнів і динамічний діапазон по входу – цілком визначаються типом використовуваного перетворювача частоти. Вимірювання рівнів і частот сигналів вимагає калібрування його коефіцієнта посилення, а також застосування синтезаторів частот з необхідною стабільністю та рівнем фазового шуму.

У системі радіоконтролю векторний аналізатор може експлуатуватися з власним перетворювачем частоти або підключатися до виходу проміжної частоти штатного аналізатора спектру або панорамного радіоприймача системи. В результаті вдається не тільки істотно підвищити швидкість і точність оцінки параметрів сигналів, але й отримати ряд абсолютно нових мо-

жливостей, недоступних традиційним засобам аналізу.

На рисунку 1 представлена структурна схема типового цифрового векторного аналізатора. Роз-

глянемо основні операції, які виконує векторний аналізатор при визначенні параметрів розподілених по частоті сигналів, які необхідно дослідити.

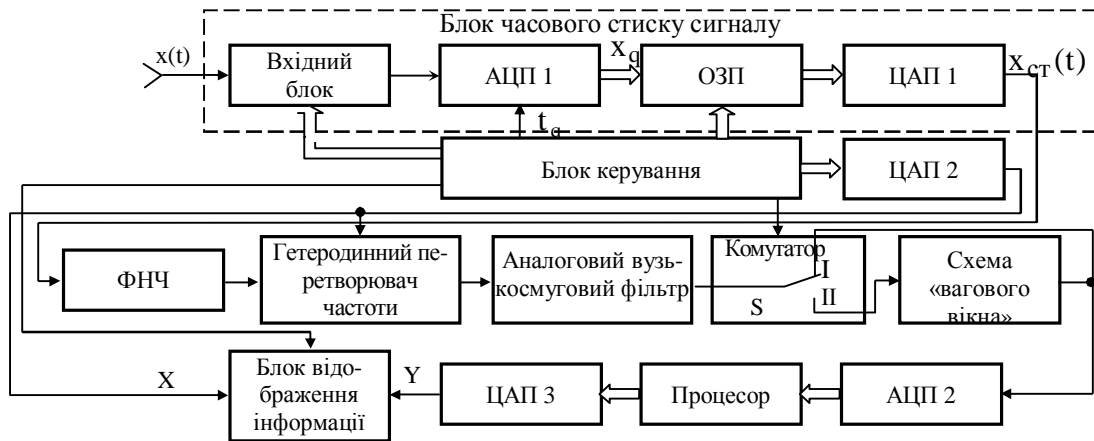


Рис. 1. Структурна схема типового цифрового векторного аналізатора

Досліджуваний сигнал $x(t)$ через вхідний блок, до складу якого входять атенуатор, фільтр низької частоти і підсилювач (на схемі не показані), потрапляє на АЦП 1, яким здійснюється перетворення миттєвих значень сигналу $x(t)$ у моменти дискретизації $t_q = q \cdot \Delta t$ у пропорційні коди $x_q \equiv x(t_q)$, $q = \overline{1, m}$.

Інтервал дискретизації Δt вибирається виходячи з теореми Котельникова, згідно з якою необхідно виконання умови $\Delta t \leq (2f_v)^{-1}$, де f_v – верхня гранична частота встановленого піддіапазону вимірювань (або спектра сигналу). В загальному вигляді $\Delta t = (k_d f_v)^{-1}$ при $k_d \geq 2$. Звичайно приймають $k_d = 2$ або $k_d = 3$, тоді частота дискретизації $f_d = 1/\Delta t = 2f_v$ або $f_d = 3f_v$. Моменти дискретизації $t_q = q \cdot \Delta t$, $q = \overline{1, m}$, задаються блоком керування, який здебільшого виконується на ЦП. Для зменшення динамічної похибки вимірювань АЦП 1 мусить бути дуже швидкодіючим. Коди миттєвих значень x_q записуються в оперативно-запам'ятовуючий пристрій (ОЗП). Після одержання та запису в ОЗП усіх m кодів миттєвих значень x_q проводиться їх зчитування з високою частотою $f_{зч}$ і введення у цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП 1), яким здійснюється відтворення сигналу $x(t)$, апроксимованого кусково-східчастою функцією, але з масштабним стиском у часі, тобто на виході ЦАП 1 створюється сигнал $x_{ст}(t)$. Коефіцієнт часового стиску $\tau/\tau_{ст} = f_{зч}/f_d = n$ у сучасних аналізаторах спектра змінюється в залежності од піддіапазону вимірювань від декількох десятків до сотень тисяч, що забезпечує розширення спектра сигналу $x(t)$ від десятків герц до декількох мегагерц.

Розглянемо основні можливості векторних аналізаторів.

Паралельний аналіз спектру дозволяє досліджувати спектри сигналів вузькосмугових систем з частотним розділенням каналів, а також вимірювати ширину спектру і несучі частоти з точністю до 100 Гц. Ще одна важлива перевага паралельного аналізу в порівнянні з послідовним – відносне підвищення швидкості побудови спектру, яка стає особливо значною при малих смугах аналізу.

Панорамний аналіз спектру і вимірювання рівнів сигналів дозволяє при формуванні спектральних панорам в широких частотних діапазонах виконувати функції послідовних аналізаторів спектру або комбінувати послідовний і паралельний режими. Послідовно-паралельний аналіз спектру використовується при середніх значеннях розрізнення. У цьому режимі швидкого перетворення Фур'є процесор обчислює обмежені по смузі фрагменти спектру на кожному кроці перебудови перетворювача частоти, а управляюча програма потім "склеює" окремі ділянки і виводить на екран повну спектральну картину.

Аналіз радіосигналів в часі. Аналіз спектру – це важлива, але далеко не єдина процедура, використовувана при виявленні і дослідженні сигналів в системах радіоконтролю. Не менший інтерес можуть представляти зміни параметрів радіосигналу в часі. Зазвичай часові характеристики оцінюються тільки в області модулюючих процесів за допомогою одного із стандартних демодуляторів, наприклад, амплітудного або частотного. Проте такий підхід може виявитися малоефективним для сучасних радіосистем, в яких передача інформації виконується за допомогою квадратурної модуляції (векторної), що припускає, в загальному випадку, одночасну зміну амплітуди і фази радіосигналу.

Аналіз параметрів модуляції. Вимірювання частоти. Реєструючи реалізації радіосигналу, цифровий процесор аналізатора працює як "програмний радіоприймач" (software radio). Цей термін означає,

зокрема, що регулювання таких параметрів прийому, як частота настройки, смуга пропускання і тип демодулятора виконується програмно без яких-небудь змін в апаратній частині. Програмна реалізація функцій демодулятора дозволяє у реальному часі виділяти і оцінювати параметри відразу трьох модульованих процесів: амплітуди, фази і частоти, а також вимірювати їх характеристики, наприклад, глибину амплітудної модуляції або девіацію частоти.

Спектральний аналіз із часовою селекцією. Послідовний аналіз спектру дає добрі результати тільки при дослідженні безперервних стаціонарних сигналів. Сигнали систем зв'язку із пакетною передачею, часовим розділенням каналів і/або псевдовипадковою перебудовою несучої частоти з'являються в смузі огляду лише на короткий час. У зв'язку з цим неспотворене представлення таких сигналів в частотній області можливо отримати тільки за допомогою паралельного аналізу. Більш того, оскільки момент появи і тривалість імпульсного сигналу в загальному випадку невідомі, його виявлення та оцінку параметрів доводиться виконувати одночасно. Для цього векторний аналізатор використовує спеціальний режим з постійним записом наступних один за одним реалізацій комплексної огинаючої у буферну пам'ять. Виконавши паралельний аналіз спектру і обчислення модулюючих процесів для кожної реалізації, можливо виявити сигнал і отримати уявлення про еволюцію його спектральних і часових характеристик у часі.

Висновки

В статті розглядаються пропозиції та основні заходи щодо використання сучасних векторних аналізаторів сигналів щодо контролю частотних параметрів радіосигналів. Векторний аналіз є універсальним інструментом дослідження та вимірювання характеристик радіосигналів у всьому використовуваному діапазоні частот від декількох кГц до десятків і сотень ГГц.

Векторні аналізатори широко застосовуються при проектуванні і випробуваннях сучасної радіотехнічної апаратури. Значний потенціал мають в своєму розпорядженні ці прилади і у сфері радіоконтролю та радіорозвідки. Застосування векторних аналізаторів дозволяє, зокрема, вирішити серйозні проблеми виявлення та аналізу сигналів сучасних цифрових мереж зв'язку, що використовують часове та кодове розділення каналів, псевдовипадкову перебудову частоти, багатопозиційну амплітудно-фазову модуляцію та інші перспективні методи передачі інформації.

Список літератури

1. Силантьєв В.А. Використання векторних аналізаторів сигналів в системах радіоконтролю // Спеціальна техніка. – 2002. – №5. – С.42-48.
2. Метрология и электроизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов / А.С. Сигов, Ю.Д. Белик и др. / Под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2005.
3. Бакланов И.Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2007.
4. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Б.П. Хромого. – М.: Радио и связь, 2006.
5. Дьяконов В.П. Анализаторы спектра // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – 185-195.
6. Дьяконов В.П., Афонский А.А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. – М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
7. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
8. Маслов А.М. Анализатор спектра АКС-1101 // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2000. – № 2.
9. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки: Навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – 524 с.
10. Воронников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. – М.: МГТУ, 2005 – 384 с.

Надійшла до редколегії 16.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА ЧАСТОТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ

С.В. Герасимов, А.А. Подорожняк, А.П. Рачинский

В статье показано значение и роль контроля за частотным распределением радиосигналов с помощью спектрального анализа. Обоснованы основные задания, которые способны решать современные векторные анализаторы спектра, их особенности, преимущества над традиционными приборами, которые используются для исследований параметров радиосигналов. Сделаны предложения и обоснованы мероприятия по осуществлению контроля за частотным распределением радиосигналов.

Ключевые слова: частотное распределение, радиосигнал, спектральный анализ, векторные анализаторы.

APPLICATION OF VECTORSCOPES FOR CONTROL AFTER THE FREQUENCY DISTRIBUTING OF RADIO SIGNALS

S.V. Gerasimov, A.O. Podorozhnyak, O.P. Rachinskiy

In the article a value and role of control after the frequency distributing of radio signals is rotined by a spectrology. Basic tasks, which are able to decide the modern vectorscopes of spectrum, their features, advantages above traditional devices which are utilized for researches of parameters of radio signals, are grounded. Suggestions are done and measures are grounded on realization of control after the frequency distributing of radio signals.

Keywords: frequency distributing, radio signal, spectrology, vectorscopes.