

УДК 621.396

І.І. Слюсар¹, М.О. Масесов², А.М. Дубік², С.В. Волошко²¹Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації НТУУ «КПІ», Київ²Полтавський військовий інститут зв'язку, Полтава

РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА ВІТЧИЗНЯНІЙ ЕЛЕМЕНТНІЙ БАЗІ

В статті запропоновано та розглянуто можливість практичної реалізації методів цифрової обробки сигналів на основі технологій цифрового діаграмоутворення, множинного входу – множинного виходу, програмної конфігурації архітектури обладнання засобів зв'язку на вітчизняній елементній базі, а також виділено напрямки подальших наукових досліджень в цій області.

цифрова обробка сигналів, цифрове діаграмоутворення, надрелеївське розрізнення сигналів, множинний вхід – множинний вихід

Вступ

Як свідчить [1], за останній час зросла кількість науково-дослідних розробок, які спрямовані на моделювання та проведення випробувань методів цифрової обробки сигналів (ЦОС) в рамках технологій цифрового діаграмоутворення (ЦДУ), множинного входу – множинного виходу (МІМО), а також програмної конфігурації архітектури обладнання засобів зв'язку (SOFTRADIO). Остання дозволяє забезпечити роботу з різними стандартами та протоколами зв'язку, а також оперативну зміну їх на нові. Підтвердженням цього є спроби американських розробників реалізувати в своїй системі Joint Tactical Radio System (JTRS) на основі SOFTRADIO приймальний пристрій з 33-ма видами модуляції сигналів з діапазоном робочих частот від 2 МГц до 50 ГГц [2]. В цілому, SOFTRADIO забезпечує оптимізацію архітектури обладнання за ресурсами та функціональністю під конкретно розв'язувану задачу.

В зв'язку з цим, досить актуальною є задача пошуку підходів щодо комплексного використання зазначених технологій в інтересах формування бази для створення перспективних телекомунікаційних мереж подвійного призначення четвертого покоління.

Аналіз літератури [1 – 4], яка присвячена ЦДУ, МІМО, SOFTRADIO, дозволяє зробити висновок про те, що впровадження зазначених технологій може розвиватися по кількох напрямках. Серед них слід виділити системи на одному кристалі, наприклад: в Швеції проводились науково-дослідні конструкторські роботи по розробці такої системи в діапазоні 8 – 10 ГГц [2].

Інший підхід орієнтований на модулі ЦОС. В залежності від типу конструктиву, вони розподіляються на монолітні у вигляді однієї плати, та мезо-нінно-модульні, коли на несучу плату встановлюються зверху додаткові плати. При цьому, в якості мікро-

схеми спецобчислювача можуть використовуватися цифрові сигнальні процесори (ЦСП), програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) або спеціалізовані мікросхеми. Однак, це вже остання стадія, коли починається велика серія. Слід зазначити, що застосування ПЛІС на відміну від ЦСП дозволяє жорстко синхронізувати покрокове виконання алгоритмів ЦОС у багатоканальних системах завдяки відмові від використання апаратних переривань. Сьогодні, на вітчизняному ринку в інтересах відомчих структур найбільш привабливими є ПЛІС фірм ALTERA та XILINX (США). Однак, в Україні поки що відсутня база відпрацьованих конкретних схемо-технічних рішень щодо спільного використання результатів наукових досліджень за вказаною тематикою.

Мета статті полягає в розробці пропозицій щодо реалізації перспективних технологій та методів ЦОС на вітчизняній елементній базі.

1. Вибір базового модулю ЦОС

Для аналізу можливих схемо-технічних рішень в якості прототипу авторами був обраний "Пристрій для реєстрації, цифрової обробки та синтезу аналогових сигналів із частотою дискретизації до 100 МГц" ADC100AS2 (надалі – модуль ЦОС) фірми "Пультар-ЛТД" (м. Дніпропетровськ, Україна) [5]. При цьому, для зниження економічних витрат проводилось тестування існуючих модулів ЦОС з інтерфейсом PCI, що дозволяє застосовувати їх зі звичайним ПК. Зазначений модуль ЦОС (рис. 1) призначений для перетворення аналогових сигналів в цифрові коди, зберігання цих кодів і передачі їх по шині PCI. Аналогова частина пристрою реалізована на основі АЦП AD9432 (12-Bit, 105 MSPS) фірми Analog Devices (США). Модуль ЦОС підтримує режим роботи із зовнішньою або внутрішньою синхронізацією запуску процесу дискретизації, а також видачу синхроімпульсу запуску

зовнішнього процесу. Встановлений на платі ЦАП і окрема буферна пам'ять ЦАП дозволяє синтезувати сигнал довільної форми з частотою дискретизації до 100 МГц. Разом з модулем поставляється відкрите програмне забезпечення.

Для підтвердження можливості реалізації перспективних технологій, а також ЦОС на основі над-релеївського розрізнення сигналів у частотній або часовій області, були створені кілька варіантів макетів пасивних та активних цифрових антенних решіток (ЦАР), наприклад: рис. 2 і рис. 3. Один з них складається з 4-х ізотропних та 4-х спрямованих антенних елементів, які розміщені на відстані не більше $\lambda/2$. Особливість розташування антенних елементів дозволяє проводити обробку сигналів з різною поляризацією.

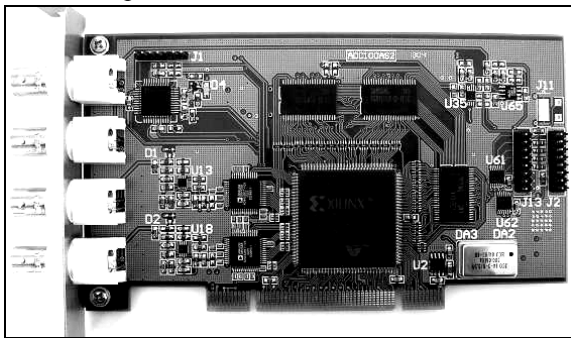


Рис. 1. Модуль ЦОС ADC100AS2



Рис. 2. Макет 4-канальної ЦАР

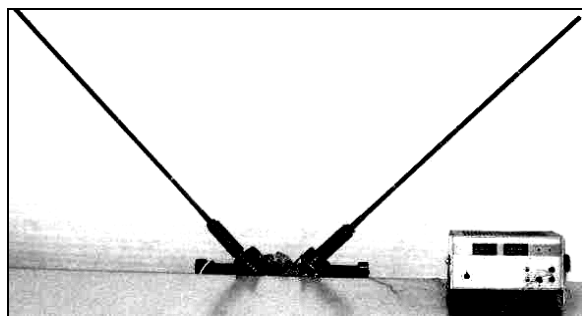


Рис. 3. Фрагмент макету ЦАР для дослідження систем з поляризованими сигналами або на базі технології MIMO

В якості джерела сигналу використовувалась PPC P-415 Н (80...120 МГц). Інший варіант передбачав використання модулів ЦОС з підсилювачами потужності в якості джерела сигналу. Для побудови підсилювача потужності була обрана схема широко-смугового підсилювача з використанням ВЧ-тран-

зисторів типу КТ-603 Б виготовлення "military". Зазначена модифікація дозволила отримати вихідну потужність порядку 200-300 мВт.

За рахунок використання наявних засобів зв'язку (наприклад, PPC P-415) були мінімізовані матеріально-часові витрати на розробку схеми синхронізації. Враховуючі те, що для формування аналогового сигналу в ADC100AS2 можливо використати тільки один ЦАП (другий разом з компаратором забезпечують режим зовнішньої синхронізації модуля ЦОС), для реалізації системи MIMO за схемою 2 на 2 на приймальній стороні потрібен один модуль ЦОС, а на передавальній 3 модулі (один - для формування синхросигналів). Схема експерименту представлена на рис. 4.

Для синхронізації приймального модуля № 4 використовується сигнал "інверсія вікна оцифровки" (контакт роз'єму J2) модуля ЦОС № 1 із тривалістю 2,62144 мс і періодом ≈ 50 мс. При цьому модуль ЦОС № 4 переведений у режим зовнішнього синхрозапуску по позитивному фронту. Синхросигнал із модуля ЦОС № 1 передається по одному з телеграфних каналів, утворених PPC P-415. Як недолік такого підходу, слід зазначити виникнення затримки синхросигналу приблизно на 4,5 мс.

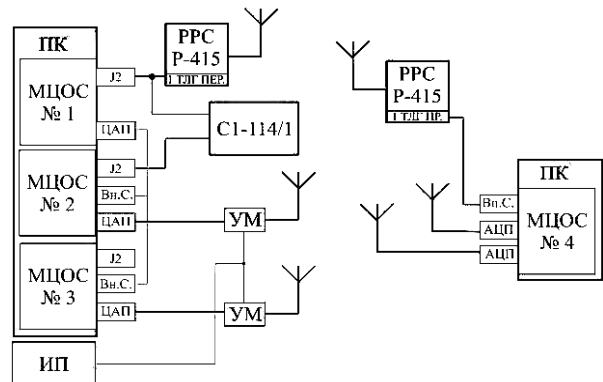


Рис. 4. Схема для проведення експериментів

Її тривалість перевищує можливий інтервал процесу оцифровки ($\approx 2,6$ мс) ADC100AS2 з буфером АЦП розмірністю 256 Кбайт, що може привести до не збігання вікон випромінювання інформаційних сигналів на передавальній та їх оцифровки на приймальній сторонах. В цілому, для компенсації зазначеного ефекту необхідно збільшити розмірність буфера АЦП приймального модуля ЦОС або ввести затримку випромінюваних інформаційних сигналів. Так як внесення конструктивних змін у модуль ЦОС умовами експерименту не передбачено, то використовується другий підхід.

В якості джерела синхросигналу для передавального сегмента системи можливо використати все той же модуль ЦОС № 1. При цьому, робота передавального сегменту здійснюється в такий спосіб. Модулі ЦОС № 2 і № 3 переведені в режим зовнішнього синхрозапуску по позитивному фронту. Їхні вхо-

ди зовнішнього синхрозапуску підключаються до виходу ЦАП модуля ЦОС № 1. До його буферу ЦАП записується сигнал у вигляді відеоімпульсу з амплітудою 8000 квантів 14-розрядного ЦАП, тривалістю всього лише 3 – 6 відліків. При цьому, вони розміщені наприкінці буфера ЦАП. У загальному випадку, часове положення відеоімпульсу (як наслідок - затримка випромінюваних інформаційних сигналів) підбирається з розрахунку максимальної компенсації затримки надходження синхросигналу на приймальний модуль ЦОС, яка пов'язана з обраним типом апаратури зв'язку. Спрощено, періоди роботи модулів ЦОС можна пояснити діаграмою сигналів "інверсія вікна оцифровки" рис. 5.

Як видно, спостерігається можливість на приймальній стороні оцифровувати фрагмент випромінюваних інформаційних сигналів. Для підтвердження цього положення на рис. 6 наведені відповідно зображення екрана 2-променевого осцилографа С1-114/1, що підключений згідно схеми рис. 4, і вікна буфера АЦП модифікованої програми "WIN_DO_" (вихідний варіант поставляється в комплекті разом з модулем AD100AS2).

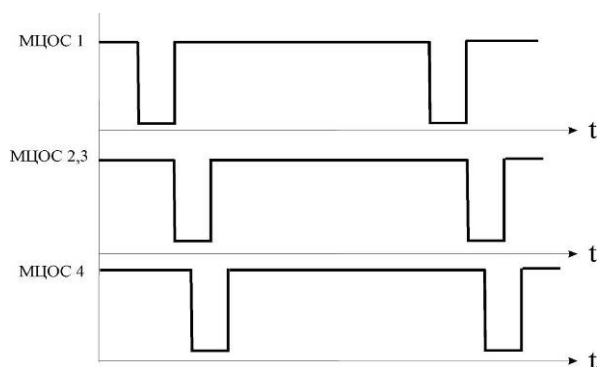


Рис. 5. Діаграма сигналів "інверсія вікна оцифровки"



Рис. 6. Екран осцилографа С1-114/1 (зліва) і вікно буфера АЦП програми "WIN_DO_"

У ході серії реалізацій процесу оцифровки встановлена гарантована тривалість фрагментів оцифрованих на приймальній стороні сигналів, що складає не менш 163800 відліків АЦП.

Для одночасної роботи кількох модулів ЦОС в одному ПК було розроблено програмне забезпечення, що дозволяє встановлювати режими і параметри, а також завантажувати незалежні образи сигналів у буфери ЦАП кожного модуля ЦОС. При цьому образи сигналів для модулів ЦОС № 2 і № 3 можуть містити інформацію тільки в останніх 164000 відліках ЦАП (максимальна розмірність буфера стано-

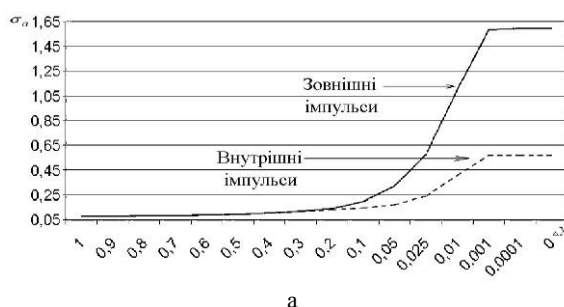
вить 262144 відліків).

2. Результати експериментальних досліджень

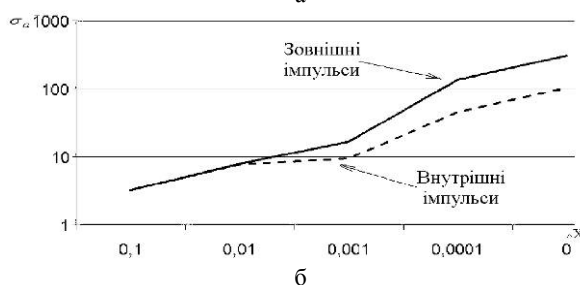
В ході експериментів досліджувались можливості апаратної компенсації "зсуву нуля" (Offset) АЦП модулів ЦОС, зовнішнього синхрозапуску кількох модулів в інтересах розподільної обробки інформації, роботи по асинхронним та жорстко синхронізованим каналам зв'язку. Крім цього, виконувалась перевірка імпульсного каналу МІМО за схемою 2 на 2. Для цього було розроблено програмне забезпечення, що дозволяє включати режими та параметри, а також завантажувати незалежні образи сигналів у буфери ЦАП кожного модуля.

При проведенні експериментів в якості антенних елементів використовувалась пара вібраторів (рис. 3). При входженні у зв'язок по каналу МІМО передавався пакет із 2 пілотних імпульсів, до амплітуди яких у процесі демодуляції повідомлень виконувалась прив'язка шкали розбивки амплітуд прийнятих інформаційних сигналів.

Результати розрахунків у пакеті Mathcad дозволяють виявити закономірності, які передбачалися на рівні гіпотези. Так, при рості СКП оцінок амплітуд від периферії пакета до його центра доцільно групувати сигнали в пакеті по величині СКП оцінок амплітуд, розрізняючи, наприклад, внутрішні й зовнішні сигнальні групи (рис. 7).



а



б

Рис. 7. СКП оцінок амплітуд сигналів довжиною 128 відліків АЦП з зсувом у часі: а – в 1/16, б – в 1/128 довжини імпульсу

Для сигналів тривалістю 128 і більше відліків і міжімпульсному часовому зсуві в 1 один відлік перехід від SIMO- до МІМО-передачі навіть із кутовим розносом випромінювачів в одну соту частки

узагальненої кутової координати дозволяє в десятки разів підвищити точність виміру амплітуд сигналів. При скороченні міжімпульсного інтервалу - рубіж у розходженнях СКП оцінок амплітуд 2-х груп імпульсів у масштабі, порівнянному з величиною СКП для режиму SIMO, проходить за рівнем одного сота кутового розносу передавальних антен. При фіксації міжімпульсного інтервалу перевага в точності оцінювання має ситуація випромінювання більш протяжних імпульсів, що обумовлено енергетичним вигравом. Це підтверджує висновок про те, що при незмінному міжімпульсному інтервалі приріст у точності виміру пропорційний квадратному кореню числа відліків АЦП, сформованих у межах парціального імпульсу. При фіксованих довжинах імпульсів визначальним фактором є не абсолютні кутові координати передавальних каналів, а кутовий рознос між їхніми антенними елементами. В цілому, отримані результати співпали з даними статистичного моделювання.

Крім розгляду технології MIMO, привертає увагу реалізований на базі модулів ЦОС варіант спільної обробки інформації за напрямком та частотою в системі зв'язку з ЦДУ на базі ЦАР. При цьому здійснювалась оцінка напрямку приходу сигналу (рис. 8.) з одночасним декодуванням повідомлень, що передавались багаточастотними сигналами типу N-OFDM (OFDM).

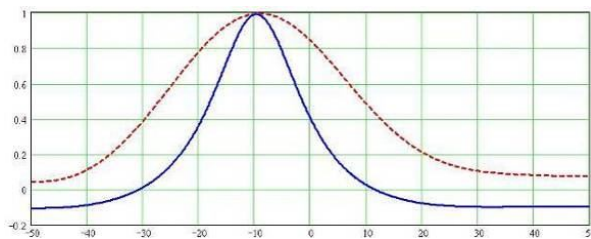


Рис. 8. Спектральна оцінка за методами Бартлета та MUSIC, яка отримана за допомогою ЦАР

3. Пропозицій щодо реалізації перспективних технологій та методів ЦОС на вітчизняній елементній базі

На основі проведених досліджень зроблений висновок, що при розробці перспективних модулів ЦОС вітчизняного виробництва необхідно вести пошук шляхів усунення обмежень, які пов'язані з технічними особливостями ADC100AS2:

- неможливість вибору тактової частоти АЦП (ЦАП) зі значенням, яке жорстко забезпечує роботу з потоками кратними $E1$;
- спостерігається нестабільність коректного зчитування даних в цикловому режимі при виборі тактової частоти АЦП (ЦАП) з коефіцієнтом ділення $K > 32$;
- при виконанні синтезу аналогового сигналу в циклічному режимі спостерігається переривання

сигналу, яке обумовлено перехідними процесами під час роботи з кінцем та початком роботи з буфером ЦАП;

- режим прямого доступу до пам'яті ПК реалізований лише при проведенні оцифровки вхідного сигналу;
- в даному варіанті виконання ADC100AS2 відсутня розв'язка між ланцюгами ВЧ-входів (виходів) та самою платою модулів ЦОС;
- відсутня можливість програмного вибору опору ВЧ-входу (виходу), який має жорстко встановлене значення 50 Ом;
- відкрите програмне забезпечення, що є в комплекті поставки ADC100AS2, не забезпечує одночасну роботу з кількома модулями;
- необхідно орієнтуватись на використання ПЛІС останніх серій.

Крім цього, в подальшому доцільно передбачити варіанти модулів ЦОС, що орієнтовані на роздільне застосування в приймальному та передавальному сегментах.

Також, важливим є питання створення відкритого прикладного програмного забезпечення модулів ЦОС. Наявність такого дозволить оперативно вирішувати велику номенклатуру інженерних задач з малими матеріальними та часовими витратами. Зазначений підхід передбачили розробники ADC100AS, яким й скористались автори. Так під час проведення досліджень була здійснена модифікація програмного забезпечення, що входить до комплексу поставки:

1. Зроблено збереження існуючої конфігурації програми в ini-файл.
2. Введено збереження параметрів DACBitRate, SampleRate, SignalPolarity під час запису до файлу образу сигналу.
3. Усунуто помилку в процедурі відкриття файлу образу сигналу.
4. Додано можливість роботи з файлами образів сигналу з довільною довжиною вибірки буферів АЦП (ЦАП).
5. Введено зчитування файлу образу сигналу, який створений в пакетах MathCad й т. ін., а також формування аналогового на його основі.
6. Додано перегляд буферу відображення з кроком 1 або 10 відліків, та переміщення по ньому на 100 відліків АЦП (ЦАП).
7. В режимі зовнішньої синхронізації введено 4096 значень регулювання порога синхронізації.
8. Здійснено можливість вибору необхідного розміру буфера ЦАП для генерації сигналу та буфера АЦП під час запису образу сигналу до файлу.
9. Введена програмна компенсація Offset АЦП для вхідних сигналів і записаних до буферу.
10. Розширено функціональні можливості програми "WIN_DO_" за рахунок доданих модулів часто-

тного детектора та спектральної оцінки за методом Бартлета і MUSIC, що працюють у реальному часі.

4. Розвиток модулів ЦОС

В ADC100AS2 використовуються ПЛІС серії Virtex другого покоління. Однак, на цей час вже існують більш перспективні рішення. Так, на у 2006 р. фірма Xilinx офіційно представила нове покоління ПЛІС, виконаних за 65-нм технологічним процесом Virtex-V [6]. Як стверджується в прес-релізі компанії, завдяки переходу на нові виробничі норми у Virtex-V вдалося досягти приросту частоти на 30 % і збільшення числа логічних вузлів на 65 % (до 330 тисяч) у порівнянні з 90-нм Virtex-IV. До складу п'ятого покоління ПЛІС входять:

- Virtex-V LX(T) – рішення для високопродуктивної логіки, (T) – з інтегрованими послідовними портами (Ethernet, RocketIO, PCIE);

- Virtex-V SXT – високопродуктивні рішення для цифрової обробки сигналів з інтегрованими послідовними портами;

- Virtex-V FXT – високопродуктивні, повнофункціональні рішення для вбудованих платформ з інтегрованими послідовними портами вводу/виводу.

ПЛІС Virtex-V LXT призначені для швидкодіючих додатків, що взаємодіють з послідовними шинами з пропускною спроможністю від 100 Мбіт/с до 3,2 Гбіт/с. До складу Virtex-V LXT включені апаратні блоки PCIE і MAC-адаптера Ethernet 10/100/1000 Мбіт/с – "жорстко запрограмовані" модулі, що є ефективнішими, як з погляду швидкодії, так й з погляду використання під ці задачі логічних вузлів. У платформі Virtex-V використані:

- 65-нм технологія ExpressFabric і Hardened IP Blocks - таблиця LUT (look-up table) з 6 незалежними виходами і діагональними внутрішніми з'єднаннями;

- друге покоління інтерфейсів вводу/виводу – технологія Sparse Chevron дозволяє задіяти до 1200 призначених для користувача інтерфейсів вводу/виводу (на 35% більше, ніж в Virtex-IV) з пропускною спроможністю 1,25 Гбіт/с, Double Data Rate (DDR) і ChipSync в кожному каналі. Також підтримуються інтерфейси (Q)DDR II.

В цілому, Virtex-V LXT забезпечують на 30% вищу швидкодію, на 65% більшу кількість логічних вузлів і споживають на 35% менше електроенергії, ніж 90-нм ПЛІС. Крім того, платформа Virtex-V LXT підтримує до 24 трансіверів RocketIO, працюючих з пропускною спроможністю 100-3200 Мбіт/с, споживаючи не більш 100 мВт на пару трансівер/приймач. Взаємодіючий з трансіверами RocketIO апаратний блок PCIE підтримує інтерфейси x1, x2, x4 і x8, а MAC-контролер Ethernet містить 4 незалежні 10/100/1000 Мбіт/с блоки, які також здатні обмінюватися даними з трансіверами RocketIO. Крім PCIE і

Gigabit Ethernet, RocketIO підтримують стандарти XAUI, SONET/SDH, CPRI і OBSAI, Serial RapidIO, HD-SDI і Fibre Channel.

Природно, що наведені дані не охоплюють всі технічні аспекти розробки модулів ЦОС, наприклад, питання вибору схем АЦП (ЦАП), шинного інтерфейсу й т. ін. Однак, вони свідчать про достатній потенціал вдосконалення вже існуючих вітчизняних розробок.

Висновки

Таким чином, отриманий досвід використання модулів ЦОС вітчизняного виробництва дозволяє виділити можливі напрямки подальших наукових досліджень:

1. Розробка методів підвищення пропускної спроможності систем зв'язку подвійного призначення на базі надрелеївського розрізнення та за рахунок використання поляризованих сигналів.

2. Модернізація існуючих і створення нових засобів зв'язку подвійного призначення з використанням перспективних технологій ЦОС на вітчизняній елементній базі.

3. Дослідження напрямків створення мультистандартних уніфікованих систем зв'язку подвійного призначення на основі ЦДУ, MIMO, SOFTRADIO.

4. Розробка адаптивних антенних систем, в тому числі й на фрактальній основі.

Список літератури

1. Уткін Ю.В., Слюсар І.І., Смоляр В.Г. Перспективи використання новітніх технологій в сучасних засобах зв'язку // Інформаційні інфраструктура і технології, ПВІЗ. – 2006. – № 1. – С. 37-41.
2. Слюсар І.І., Уткін Ю.В. Базові технології для створення універсальних платформ широкосмугового доступу // Зб. матеріалів III-ї НПК "Пріоритетні напрямки розвитку теле-комунікаційних систем спеціального призначення". – К.: ВІПІ НТУУ "КПІ". – 200. – С. 44-48.
3. Слюсарь І.І., Дубик А.Н. Многопоточний мультипроцесинг в імпульсній системі MIMO // Сб. наукових трудов по матеріалам 11-го ювілейного міжнародного молодіжного форуму "Радиоелектроника и молодежь в XXI веке". – Х.: ХНУРЕ. – 2007. – С. 21.
4. Слюсар В.І. SMART-антенни. Цифровые антенные решетки (ЦАР). MIMO-системы на базе ЦАР // В книге "Широкополосные беспроводные сети передачи информации". Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера. – 2005. – С. 507-569.
5. Офіційний сайт фірми «Пулсар-ЛТД» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.pulsar.org.ua>.
6. Офіційний сайт фірми «Xilinx» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.xilinx.com>.

Надійшла до редколегії 29.09.2007

Рецензент: канд. техн. наук, доцент В.В. Варич, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації НТУУ «КПІ», Київ.