

Р. Д. АХМЕДОВ

Україна, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
E-mail: rolan.akhmedov@karazin.ua

ВИОКРЕМЛЕННЯ КОРИСНОЇ ІНФОРМАЦІЇ З НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ХВИЛІ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Розроблено методику виокремлення корисної інформації з надширокосмугової імпульсної хвилі, засновану на використанні фізичних нейронних мереж довготривалої короткострокової пам'яті. Проведено моделювання процесів випромінювання, приймання та обробки імпульсної хвилі з урахуванням ефектів ближньої зони випромінювання та паразитних завад. Як передавальну розглянуто лінзову антену імпульсного випромінювання.

Ключові слова: надширокосмугова імпульсна хвиля, лінзова антена імпульсного випромінювання, ближня зона, фізична нейронна мережа, довгострокова короткотривала пам'ять.

Новою сферою застосування послідовної надширокосмугової радіоелектроніки (DS-UWB) сьогодні стає інтернет речей. Основними чинниками для цього стали високий рівень інформаційної безпеки, порівняно низький рівень споживання електроенергії та її стійкість до вузькосмугових завад. Функціонування таких пристроїв на маленькій відстані для задач інтернету речей є, скоріше, перевагою, аніж недоліком, через зменшення радіозабруднення приміщення.

Принцип роботи сучасного надширокосмугового (НШС) імпульсного радіо послідовної передачі [1] можна узагальнити наступною функціональною схемою (рис. 1).

Процес перетворення прийнятої імпульсної електромагнітної хвилі в фідерній системі в сигнал у проводі узагальнюють як масштабно-часове перетворення, яке може бути технічно реалізовано у різний спосіб [2]. Існуючі принципи аналогової обробки прийнятого імпульсного радіосигналу успадковані від схемотехніки, вони застосовувались до гармонійних сигналів [3]: для обробки отриманого з антени електричного струму використовується послідовна фільтрація та підсилення з подальшим оцифру-

ванням за допомогою АЦП і цифрової обробки в модулях FPGA (рис. 1).

Кожен з послідовних етапів аналогової обробки, направлений на покращення окремої характеристики сигналу, неминуче впливає і на інші його характеристики, що призводить до накопичення похибки та втрати частини інформації про сигнал та про шум, а саме:

— лінійне покращення співвідношення сигнал-шум (фільтрація) на практиці має незначний нелінійний вплив на інші характеристики НШС-сигналу, наприклад на крутизну імпульсу;

— квазілінійне підсилення незначним чином впливає на форму імпульсу за рахунок нелінійності амплітудно-частотної характеристики, а також підсилює артефакти завад;

— аналогово-цифрове перетворення сигналу губить частину інформації про НШС-шум через дискретизацію, яка може не відповідати критеріям Найквіста.

Таким чином, в модуль FPGA на числову обробку потрапляє дещо видозмінений порівняно з початковим сигналом. Крім того, через необхідність проведен-

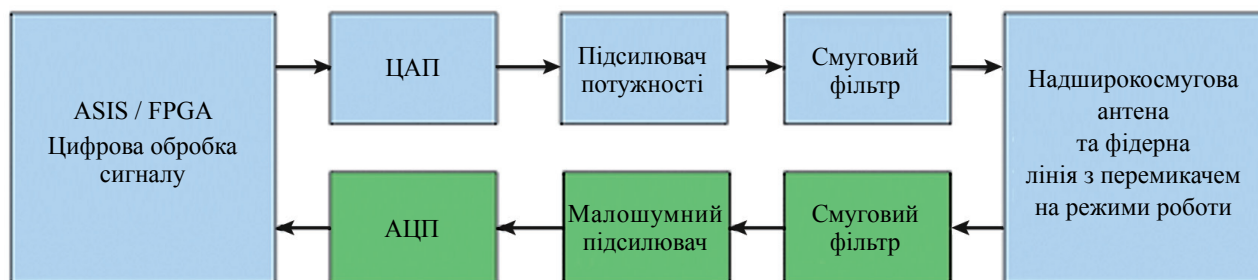


Рис. 1. Класична схема імпульсного надширокосмугового радіо

ня обробки в квазіреальному часі сам алгоритм зазвичай вибирається простим. Тобто, при використанні функціональної схеми на рис. 1 для послідовного виокремлення корисної інформації з сигналу знижується якість роботи радіообладнання через неможливість врахування природи поширення імпульсних електромагнітних хвиль:

— в ближній зоні антени форма отриманого сигналу значною мірою залежить від напрямку спостереження [4—6], а радіосистеми не враховують особливості розповсюдження хвиль, спираючись лише на форму отримуваних сигналів;

— не враховується нелінійна природа поширення імпульсних хвиль в просторі та в компонентах антенно-фідерної системи [7].

У даній роботі запропоновано альтернативний спосіб виокремлення корисної інформації з надширокопосмугової імпульсної електромагнітної хвилі, вільний від згаданих недоліків, а також проведено його теоретичне порівняння з класичним імпульсним радіо прямої послідовності (DS-UWB).

Вплив ефектів ближньої зони на форму надширокопосмугового електромагнітного імпульсу

Розглянемо вплив ефектів ближньої зони на хвилі, збуджені лінзовою антеною імпульсного випромінювання (LIRA). Така антена низької добротності (рис. 2) формує високонаправлене імпульсне поле за рахунок діелектричного наповнення і еліптичної лінзи у розкритті TEM-рупора. Скористаємося перехідною функцією цієї антени $\vec{E}_0$ та інтегралом Дюамеля [6] для побудови поля у ближній зоні для різних точок спостереження та різних збуджуючих струмів.

Розглянемо точки спостереження r_1 та r_2 в циліндричній системі координат: $r_1 = \{0; 0; 2R\}$ та $r_2 = \{R/2; \pi/2; 2R\}$, де R — радіус апертури антени. Змодельовавши в цих точках імпульсні поля, викликані збудженням різного типу (гаусіан та похідна від гаусіана), можна наглядно проілюструвати (рис. 3), що в окремих випадках ці поля можуть бути схожими між собою, а значить, в умовах завад це може призвести до збільшення похибки в роботі лінійного фільтру.

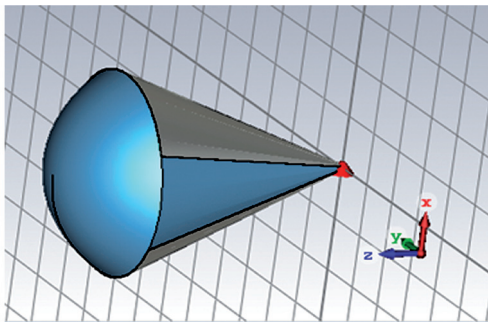


Рис. 2. Модель лінзової антени імпульсного випромінювання в програмі-симуляторі CST Studio

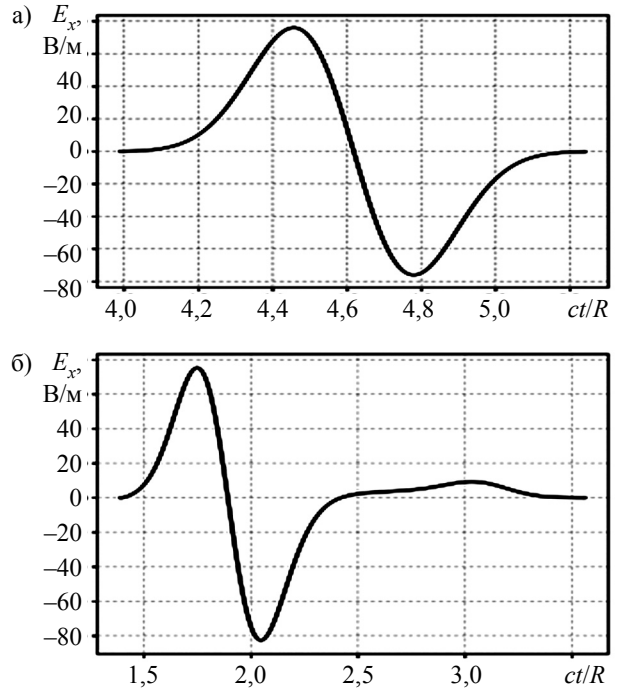


Рис. 3. Компонента E_x поля LIRA при збуджувальному імпульсі у вигляді гаусіана (а) та похідної від гаусіана (б) у точках спостереження r_1 (а) та r_2 (б)

(на осях абсцис відкладено безрозмірну величину, пропорційну добутку часу поширення хвилі t на швидкість світла c)

Імпульсний радіоприймач на базі фізичної нейронної мережі

Рівень оптимізації сучасних програмних інструментів машинного навчання, таких як CUDA та Tensorflow, а також рівень розвитку апаратних інструментів GPU/ASIC дозволяють аналізувати цифрові часові послідовності за період порядку десятків мілісекунд, що дозволяє використовувати такі інструменти при роботі з сигналом у квазіреальному часі, опрацьовуючи сигнал після АЦП. Недоліком такого методу може бути висока вартість кінцевих виробів, а також високий рівень споживання енергії. З іншого боку, зараз швидко розвиваються фізичні штучні нейронні мережі (ШНМ), виконані за технологією CMOS. На такі пристрої можна подати сигнал напряму з антенно-фідерної системи. Вони вже широко застосовуються радіотехніками в галузі когнітивного радіо [8], а також адаптивних вузькопосмугових антенних систем [9]. В цих задачах фізичні штучні нейронні мережі використовуються для оптимізації деяких параметрів прийому-передачі сигналу в режимі реального часу.

Останнім часом технічний розвиток в галузі апаратних штучних нейронних мереж дозволив втілювати їхні різноманітні топологічні особливості в електронних аналогових пристроях. Проаналізуємо можливість застосування цих технологій для задач класифікації отриманого сигналу (sequence-to-label) та

визначення його присутності в кожен момент часу (sequence-to-sequence).

Важливим для покращення технічних характеристик імпульсного радіо є зменшення проектних норм CMOS-техпроцесу. Наразі існують готові прилади LSTM, виконані за 180-нм нормами [10]. Перехід до 5-нм норм, що зараз активно освоюються, дозволить збільшити швидкість обробки сигналів у 10^9 разів порівняно з класичними схемами імпульсного радіо з аналогічною цифровою обробкою. Штучна нейронна мережа в даному випадку є електричним колом, внутрішня передавальна функція якого визначається лінійною комбінацією деякого набору матричних характеристик. Тобто задача обробки прийнятого радіосигналу зводиться до пошуку необхідних матричних параметрів за допомогою різноманітних методів оптимізації. Наприклад, для цього добре підходять градієнтні методи навчання з учителем, де конкретна імплементація процесу тренування та набір тренувальних даних залежить від типу розв'язуваної задачі.

Як приклад нейронної архітектури для кіл обробки радіосигналу розглянемо схему encoder-decoder [11]. В цій архітектурі нейронна мережа топологічно розбивається на дві частини. Перша, енкодер, трансформує вхідну часову послідовність в деякий набір параметрів, які однозначно характеризують вхідний сигнал, тобто енкодер проектує вхідний сигнал на деякий ознаковий простір. Друга частина мережі, декодер, перетворює набір ознак в ту якісну або кількісну характеристику, яку передбачено постановкою задачі, наприклад: для задачі телекомунікації — це інформаційне повідомлення, для радарної задачі — це положення та тип цілі.

Вихідний сигнал, продукований фізичною нейронною мережею, визначається активаційною функцією вихідного нейрону. Цифровий вихідний сигнал можна отримати ступеневою активаційною функцією (персептрон Розенблата), що дозволяє зручно використовувати описаний пристрій як мережевий інтерфейс комп'ютера чи джерело керуючого сигналу для робототехніки.

Формування тренувальних даних для нейронного радіо

Розглянемо задачу односторонньої передачі інформації через нейронне радіо. Роль передавальної антени буде виконувати антена типу LIRA, а приймальної, для спрощення, — ідеальний надширокопосмуговий вимірювач напруженості електричного поля, який не впливає на форму отриманого сигналу. Сигнал з приймальної антенно-фідерної системи подається на деяку фізичну нейронну мережу. Напруженість електричного поля $\vec{E}_{tx}$, породженого випромінювальною антеною, можна визначити в довільній точці спостереження при довільному збудженні з урахуваннями ефектів ближньої зони, користуючись інтегралом Дюамеля та перехідною

функцією передавальної антени $\vec{E}_0$. Тоді отриманий з антенно-фідерної системи сигнал буде пропорційний компонентам напруженості електричного поля випромінювальної антени. Якщо здійснювати гіпотетичне вимірювання в площині, де спостерігається 0X-компонента напруженості поля, а приймальна лінія є ідеально узгодженою і не має втрат, то отриманий сигнал матиме вигляд

$$f_{rx}(\vec{r}, t) = \int_0^t \frac{df_{tx}}{d\tau} \vec{E}_0(\vec{r}, t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

де $f_{tx}(t)$ — функція, що описує збуджувальний сигнал.

Знайдемо оптимальну нейронну архітектуру, а також її вагові коефіцієнти, які дозволять співвіднести прийнятий сигнал з деяким типом збудження на передавачі в умовах завад та врахувати деякі ефекти ближньої зони.

Тренувальний набір даних для цієї задачі складатиметься з пар часових послідовностей: струму збудження передавальної антени $f_{tx}(t)$ та струму, що буде отримано приймачем $f_{rx}(t)$ при різних його розташуваннях відносно системи координат передавача (див. рис. 2).

Для максимально коректного функціонування мережі в заданих умовах набір тренувальних даних має містити вичерпну інформацію про поведінку поля у всій області функціонування антенної системи, тобто містити вимірювання в ближній і дальній зонах. Згідно з визначенням дальньої зони відстань z від джерела, де необхідно проводити вимірювання, лежить у діапазоні $0 \leq z \leq 8R$. Направленість антен типу LIRA дозволяє обмежити радіус поперечного зрізу циліндричної області, де проводяться вимірювання: $0 \leq \rho \leq R$, а симетрія джерела — розглядати не весь зріз, а лише його першу чверть: $0 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Для наближення моделі до реальних умов до кожної отриманої числової послідовності $f_{tx}(t)$ додамо деяку випадкову заваду. Найпростішою моделлю врахування завад в задачах комунікації є канал зв'язку з адитивним білим гаусовим (AWG) шумом, де енергія шуму визначається як квадрат середнього відхилення. Для оцінки зашумленості електромагнітного імпульсу вводять критерій SNR за децибельною шкалою:

$$\text{SNR} = 10 \lg W(\sigma^2), \quad (2)$$

де $W(\sigma^2)$ — енергія електромагнітної хвилі;

σ — другий статистичний момент моделі білого гаусового шуму.

Зазначимо, що у цьому виразі не враховано вплив постійної фонові напруженості поля, яка фігурує в моделі білого шуму для каналу зв'язку, через відсутність його впливу на часову залежність прийнятого сигналу.

Через направлені властивості антени, навіть при постійному рівні завад, отриманий набір даних скла-

датиметься зі зразків з різним значенням SNR: більшим на осі випромінювання та меншим на периферії, як це видно з **рис. 4**. Отже, постає питання щодо необхідної пропорційності кількостей N сильно- та слабозашумлених зразків для досягнення найкращої точності моделі на реальній задачі. Для якісного навчання необхідно, щоб розподіл тренувальних даних за значенням SNR відповідав імовірнісному розподілу прийнятих сигналів за значенням SNR в умовах реального використання. Припустимо, що користувачі пристроїв будуть намагатися вести приймання-передачу, максимізуючи SNR, тоді реальний імовірнісний розподіл прийнятих сигналів матиме вигляд гаусового через статистичні відхилення від ідеальних параметрів та в умовах завад.

Для якісного процесу навчання необхідно, щоб тренувальний набір даних не лише містив всю палітру значень SNR на кожній епісоді навчання, а ще й послідовно зменшував його середнє значення, досягаючи локального мінімуму цільової функції.

Для перевірки можливостей нейронного радіо відрізняти різні види сигналів розглянемо відразу декілька різних збуджувальних імпульсів:

$$f_0(t) = 0; \quad (3)$$

$$f_1(t) = \text{sinc}(t - \tau/2); \quad (4)$$

$$f_2(t) = \exp(-(t - \tau/2)^2); \quad (5)$$

$$f_3(t) = \frac{d}{dt} \exp(-(t - \tau/2)^2). \quad (6)$$

В такому випадку отриманий набір даних матиме чотири класи, де окремим класом є той, що містить лише шум AWG $f_0(t)$. Для дотримання збалансованості даних в процесі навчання до рандомайзера додамо випадковий рівномірно розподілений дискретний параметр, що відповідатиме типу збудження, тобто виразам (3) — (6). Для максимізації якості навчання розглянемо лише той набір даних, де вибірки за типом збудження кількісно збалансовані.

Процес навчання штучної нейронної мережі може проходити як на комп'ютері, так і на апаратному мо-

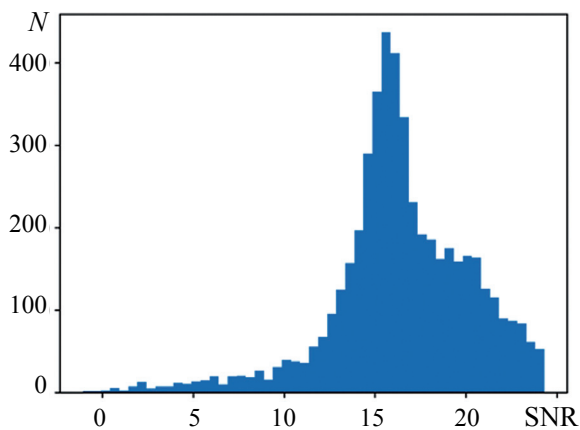


Рис. 4. Рівень зашумленості набору тренувальних даних

дулі за рахунок створення спеціальних програмних драйверів до апаратної частини. В межах поставленої у даному дослідженні задачі достатнім є навчання на комп'ютері на ресурсах CPU і GPU.

Набір тренувальних даних для навчання необхідно дискретизувати. Для вибору частоти дискретизації скористуємося критерієм Найквіста. В такому разі кожен зразок тренувального набору складатиметься з часової послідовності, що відповідає прийнятому сигналу, та метаданих, що описують тренувальний зразок, а саме: значення енергетичного SNR, тип збудження, точка спостереження, ефективна тривалість збудження та інше. Для цього зручно використати формати зберігання даних JSON та TFRecord.

Моделювання детекції сигналу для рекурентних моделей

Рекурентні моделі, на відміну від повнозв'язної, можуть працювати як за схемою many-to-one, так і за схемою many-to-many, коли вхідний сигнал в кожен момент часу описується затребуваною якісною або кількісною характеристикою.

У випадку many-to-one прогноз нейронної мережі стосується ковзного вікна в цілому, а отже, точність визначення меж сигналу у часі буде визначено розміром вікна спостереження, яке в декілька разів ширше за сигнал. Моделі, що працюють за схемою many-to-many, позбавлені цього недоліку і за рахунок наявності оцінки сигналу в кожен момент часу надають чітку межу присутності імпульсу у деякому сигналі.

Основним недоліком класичної рекурентної ШМ є нестабільність процесу навчання — так звані проблеми зникання та вибуху градієнту (exploding gradient та vanishing gradient). Саме для вирішення цих проблем були створені рекурентні мережі з більш складним зворотнім зв'язком GRU та LSTM [14].

На **рис. 5** зображено схему нейронного радіо з використанням рекурентних штучних нейронних мереж. Нейрони останнього шару (декодеру) мають сигмоїдальні активаційні функції, а їхні вихідні значення описують імовірність спостереження сигналу певного типу. Вхідний шар ШМ — рекурентний LSTM, тобто закладається з ланцюжку однакових нейронів. Описана штучна нейронна мережа має лише 116 змінних параметрів.

Спершу розглянемо якість роботи рекурентної аналогової штучної нейронної мережі, організованою за схемою many-to-one.

На **рис. 6**, а зображено зміну значень цільової функції в процесі навчання. Тут видно, що швидкість тренування не є рівномірною — спостерігаються “плато” зі сталими значеннями цільової функції за виключенням випадкових викидів. Подальший аналіз показав, що кожен з таких відрізків відповідає за навчання розпізнаванню кожного з типу сигналів, що вивчаються. Як можна помітити, кожен на-

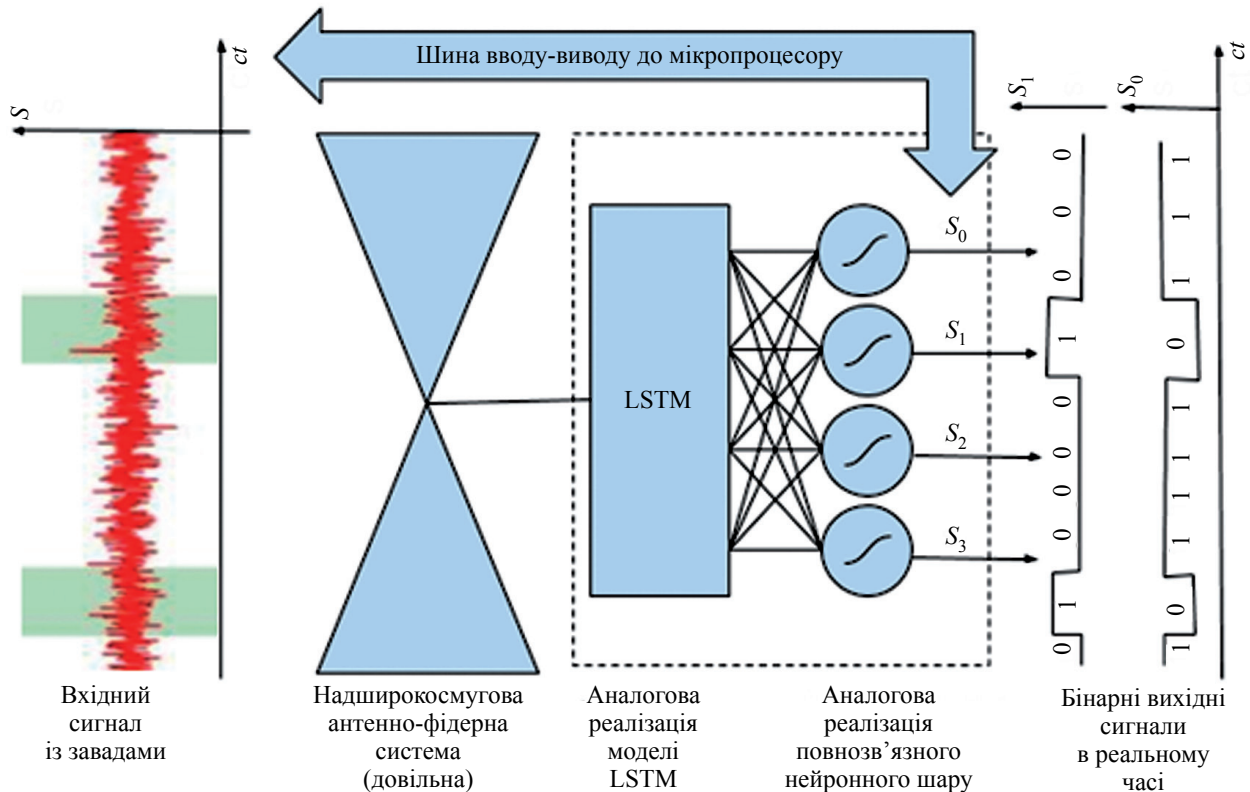


Рис. 5. Схема імпульсного радіо на основі нейронної мережі довгої короткотривалої пам'яті

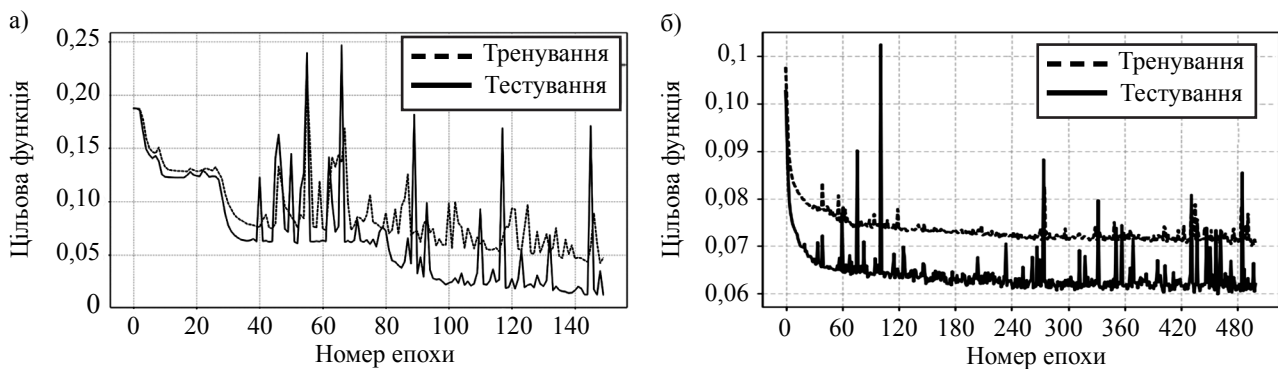


Рис. 6. Зміна значення цільової функції моделі LSTM в процесі тренування за моделями many-to-one (а) та many-to-many (б)

ступний тип сигналу вивчається довше попереднього. Порядок вивчення імпульсів теж виявився не випадковим: чим ширший спектр має імпульс, тим пізніше починається і довше триває його запам'ятовування.

Бачимо, що застосування нейронних мереж замість лінійної фільтрації дозволяє здійснювати класифікацію імпульсів у ближній зоні антени, де форма сигналу досить мінлива [15]. Використовуючи рекурентні нейронні мережі, натреновані за схемою many-to-one, можна досягти точності 99,7%.

Тепер розглянемо тренування за моделлю many-to-many. Топологія мережі така сама, тобто як на рис. 5, дані для тренування ануюються окремо в кожен момент часу, замість анування даних для вікна спостереження. На рис. 6, б зображено зміну значень ці-

льової функції в процесі тренування такої нейронної мережі для розв'язання задачі маркування послідовності. Мінімальне значення цільової функції дозволить максимізувати здатність моделі визначати імовірність присутності сигналу певного виду в певний момент спостереження. Як видно, при переході від many-to-one до many-to-many тренування помітно сповільнилось.

На рис. 7 представлено суміщені у часі вхідний та вихідні струми фізичної штучної нейронної мережі, яку використано для класифікації прийнятого надширокопasmового сигналу в кожен момент часу, тобто для вирішення задачі маркування часової послідовності. В представленому зразку вхідних даних спостерігається отриманий при положенні приймача $\vec{r}_2$

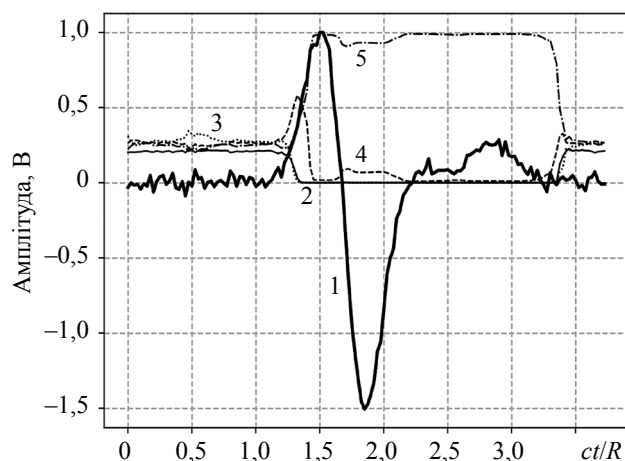


Рис. 7. Вхідний сигнал (1) та вихідні (2—5) сигнали різного типу (f_0 — f_3) фізичної ШНМ при положенні приймача $\vec{r}_2$: 2 — f_0 ; 3 — f_1 ; 4 — f_2 ; 5 — f_3

імпульс, породжений збудженням антени типу LIRA, що має часову залежність у вигляді похідної від гаусіана, що описується виразом (6), — крива 5. Як було показано на рис. 3, отриманий імпульс спостерігається з таким відхиленням від осі 0Z, що за своїми спектральними характеристиками стає невідрізненим від імпульсу, породженого збудженням з часовою залежністю у вигляді функції Гауса (5) — крива 4.

Зазначимо, що вихідні сигнали нейронної мережі — це електричні струми, а сумарне значення їхніх амплітуд в кожен момент часу дорівнює одиниці. Фізичним змістом вихідних амплітуд є імовірність присутності сигналу певного типу (3) — (6) в окремий момент спостереження випадкового процесу $f_{rx}(t)$.

Для проміжку часу, що передує імпульсу, який на графіку спостерігається наочно, імовірності приналежності вихідного сигналу до кожного з чотирьох розглянутих типів залишаються приблизно рівними та складають близько 25%. Це означає, що у випадку наявності білого шуму величину сигналу на виході нейронної мережі виявити правильно фактично неможливо. Але наявність сигналу можна визначити, аналізуючи всі вихідні значення ШНМ: якщо імовірності наявності сигналів кожного з типів рівні (в тому числі і нульові), це означає, що спостерігається лише шум, і цю системну похибку можна врахувати відповідним чином. (Таку похибку можна пояснити тим, що нейронна мережа намагається виділити в шумі сигнал кожної з вивчених форм, а не знайшовши його, вона видає мінімальний рівноімовірний результат.)

Дані рис. 7 ілюструють, що навіть у ближній зоні, де форма імпульсу може змінюватись настільки, що стає більше схожою на інший сигнал, нейронне радіо гарантує стійкий режим роботи. Починаючи з моменту, коли сигнал спостерігається наочно (від 1,1 до 1,3), деякий час зростає імовірність приналежності сигналу до деяких типів, що можна пояснити схожістю градієнта часової послідовності на градієнт сигналів

різних типів. Далі значення імовірностей стабілізуються на весь час тривалості сигналу.

Зазначимо, що точність роботи мережі на валідаційному наборі даних впала до 98,9%, що є закономірним при підвищенні точності визначення тривалості сигналу.

Застосування нейронного радіо для надшироко-смужової імпульсної цифрової комунікації

Як було показано, застосування енкодера у вигляді рекурентної нейронної мережі робить нейронне радіо придатним для практичної реалізації завдяки суттєвому зменшенню кількості штучних нейронів, а також покращує якість роботи за рахунок топологічного врахування принципів причинності та суперпозиції.

З метою спрощення промислового виробництва пристроїв для первинного навчання нейронного радіо зазвичай замість експериментальних вимірювань застосовуються дані, отримані теоретичним моделюванням, що викликає падіння точності детектування. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є застосування методів переносу навчання, які широко використовуються в задачах аналізу часових послідовностей.

Сутність методів переносу навчання полягає в дотренуванні окремих елементів мережі при використанні експериментально отриманих даних для адаптації її параметрів до реальних умов. Таким чином, первинне тренування на даних, отриманих моделюванням, дозволяє суттєво зменшити об'єм необхідних емпіричних вимірювань.

Користуючись формулою Шенона для надшироко-смужових систем [1], можна оцінити перспективність кодування інформації великою кількістю імпульсів різної форми та тривалості:

$$C = \frac{1}{N_{smp}} \frac{\log_{N_{smp}}(1 + \text{SNR})}{1/B + \tau_{\text{RMS}}}, \quad (7)$$

де C — інформаційна ємність;

N_{smp} — кількість доступних імпульсів різної форми та тривалості (radix);

B — ширина спектру;

τ_{RMS} — скважність.

Аналізуючи залежність між інформаційною ємністю та кількістю імпульсів, можемо зробити висновок, що збільшення кількості доступних імпульсів N_{smp} з класичних двох до шести збільшить кількість інформації в три рази.

Перспективним напрямком дослідження в області нейронного радіо є застосування імпульсних штучних нейронних мереж замість штучної нейронної мережі прямого поширення. Тренування таких мереж здійснюється шляхом самоорганізації системи під зовнішнім впливом з позитивним підкріпленням. Виконати такі мережі у вигляді аналогової мікросхеми простіше,

ніж мережі прямого поширення. З огляду малого обсягу інструментального апарату для навчання таких моделей цей підхід в даній роботі не розглядається, але швидкий розвиток подібних технологій робить такі дослідження перспективними в майбутньому.

Висновки

Імпульсні надширокопосмугові радіотехнічні пристрої мають теоретичні переваги над вузькосмуговими в плані інформаційної ємності [1], але на практиці не вдавалось використовувати ці переваги повною мірою через певні складності обробки НШС-сигналів. Запропонований підхід виокремлення корисної інформації з імпульсної НШС електромагнітної хвилі дозволяє покращити характеристики таких комунікаційних систем завдяки врахуванню залежності форми імпульсу від напрямку спостереження.

Вихідний сигнал нейронного радіо надає інформацію не лише про присутність отриманих імпульсів певного типу, а ще й про імовірність, з якою вони спостерігаються. Цю інформацію можна застосовувати для керування адаптивними антенними системами та системами когнітивного радіо, які також можуть складатись з фізичних нейронних мереж.

Порівняння рівня споживання електроенергії аналогового нейропроцесора та аналогічного цифрового пристрою GPU/ASIC показало кращу енергоефективність для першого. Відтак, використання аналогового нейропроцесору замість лінійного фільтру, АЦП та FPGA дозволяє застосовувати математичні процеси високої складності при значно меншій витраті енергії.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Lecoindre A., Dragomirescu D., Plana R. IR-UWB channel capacity for analog and mostly digital implementation. *2008 International Semiconductor Conference*, 2008, vol. 2, p. 403–406, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2008.4703439>.
2. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. *Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений*. Москва, Радио и связь, 1989, 192 с.

3. Molisch A. F. Ultra-wideband communications: An overview URSI. *Radio Science Bulletin*, 2009, vol. 329, p. 31–42, <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2009.7909730>.
4. Wu Tai Tsun. Electromagnetic missiles. *Journal of Applied Physics*, 1985, vol. 57, p. 2370–2373.
5. Седин Л.Г. Импульсное излучение антенны с круглой апертурой, возбужденной единичным скачком тока (переходная диаграмма). *Радиотехника и электроника*, 1992, № 10, с. 1783–1787.
6. Akhmedov R., Dumin O., Katrich V. Impulse radiation of antenna with circular aperture. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, vol. 77, p. 1767–1784.
7. Butrym A.Yu, Zheng Yul, Dumin A.N., Tretyakov O. Transient wave beam diffraction by lossy dielectric half space. *Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2014, p. 26–28, <https://doi.org/10.1109/MMET.2014.6928717>.
8. Al-Husseini M., Kabalan K., El-Hajj A., Christodoulou Ch. Cognitive radio: UWB integration and related antenna design. Chapt. 20 in book: *New Trends in Technologies: Control, Management, Computational Intelligence and Network Systems* (ed. by. Er Meng Joo), 2010, <https://doi.org/10.5772/293>
9. Tobes Z., Raida Z. Use of the analog neural networks in the adaptive antenna control systems. *Radioengineering*, 2002, vol. 11, p. 14–21.
10. Zhao Z., Srivastava A., Peng L., Chen Q. Long short-term memory network design for analog. *Computing ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, 2019, vol. 15, no. 1, article 13, 27 p., <https://doi.org/10.1145/3289393>
11. Hamilton W., Ying R., Leskovec J. Representation learning on graphs: methods and applications. *IEEE Data Engineering Bulletin: Social and Information Networks, Machine Learning*, 2017.
12. Zhang J., Orlik P. V., Sahinoglu Z. et al. UWB systems for wireless sensor networks. *Proc. of the IEEE*, 2009, vol. 97, p. 313–331.
13. Kussul E., Baidyk T. Improved method of handwritten digit recognition tested on MNIST database. *Image and Vision Computing*, 2004, vol. 22, p. 971–981.
14. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-term memory. *Neural Computation*, 1997, Vol. 9, p. 1735–1780.
15. Akhmedov R., Dumin O. Ultrashort impulse radiation from plane disk with uniform current distribution. *2018 9th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, 2018, Ukraine, Odessa, p. 169–173, <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2018.8520223>
16. Wolter M., Yao A. Complex gated recurrent neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018, vol. 31, p. 10536–10546.

Дата надходження рукопису
до редакції 18.06 2020 р.

DOI: 10.15222/TKEA2020.3-4.03
УДК 537.87

Р. Д. АХМЕДОВ

Украина, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
E-mail: rolan.akhmedov@karazin.ua

ВЫДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлена авторская методика выделения полезной информации из сверхширокополосной импульсной электромагнитной волны, которая основана на применении физических нейронных сетей длительной краткосрочной памяти. Проведено моделирование процессов излучения, приема и обработки импульсной волны. В качестве передающей антенны выбрана линзовая антенна импульсного излучения. Для моделирования процесса излучения электромагнитных волн с заданными временными зависимостями возбуждающего тока использована переходная функция антенны и принцип суперпозиции, формализованный интегралом Дюамеля. Моделирование проведено с учетом эффектов ближней зоны излучения и паразитных шумов. Проанализирована перспектива применения предложенной методики в задачах интернета вещей.

Ключевые слова: сверхширокополосная импульсная волна, линзовая антенна импульсного излучения, ближняя зона, апартная нейронная сеть, долгая краткосрочная память.

INFORMATION EXTRACTION FROM ULTRAWIDEBAND
ELECTROMAGNETIC WAVE IN NEAR RADIATION ZONE

The authors study the dependence of the shape of electromagnetic pulse received in near radiation zone of the antenna on the observation point. The paper discusses negative and positive effects of this phenomenon on the wireless impulse communication and presents a new method of information extraction from ultrawideband electromagnetic pulse, comparing it to the traditional way of signal processing.

The method is based on modern deep learning technics and recurrent neural networks, namely physical long short-term memory. Moreover, the paper presents a concept of direct sequence ultrawideband (DS-UWB) impulse radio receiver based on a physical neural network. It is proposed to change the traditional way of radio signal processing and use a single neural network instead of a matched filter, a magnitude amplifier and a FPGA processor. The architecture of the physical neural network was designed with an intention to study the behavior of ultrawideband short pulse (UWB-SP) radio signal in near and far radiation zones.

The applicability of the neural radio concept is proved by simulation of AWGN communication channel for multiuser environment and real time RX signal processing by the designed neural network. The paper contains the results of a numerical modeling of the radiation-reception process and illustrations of the neural network training process. The lens impulse radiation antenna is considered as radiator of transient electromagnetic field for simulation. The radiation process is modeled with the help of the antenna's transient response obtained using the evolution approach and the superposition principle in the form of Duhamel integral.

The prospects of using the proposed methodology in the problems of the Internet of Things are analyzed. The study shows that using the proposed method allows solving multipathing and multiuser problems even in near radiation zone.

Keywords: ultrawideband (UWB), electromagnetic pulse (EMP), lens impulse radiation antenna (LIRA), near zone, physical neural network, long short-term memory (LSTM).

REFERENCES

1. Lecointre A., Dragomirescu D., Plana R. IR-UWB channel capacity for analog and mostly digital implementation. *2008 International Semiconductor Conference*, 2008, vol. 2, pp. 403–406, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2008.4703439>.
2. Astanin L.Yu., Kostylev A.A. *Osnovy sverkhshirokopolosnykh radiolokatsionnykh izmereniy* [The basics of ultrawideband radiolocation measurements], 1989, Moscow, Radio i svyaz', 192 p.
3. Molisch A. F. Ultra-wideband communications: An overview URSI. *Radio Science Bulletin*, 2009, vol. 329, pp. 31–42, <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2009.7909730>.
4. Wu Tai Tsun. Electromagnetic missiles. *Journal of Applied Physics*, 1985, vol. 57, pp. 2370–2373.
5. Sodin L.G. [Impulse radiation of antenna with circular aperture that is excited by heaviside step function i.e. transient response]. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1992, no. 10, pp. 1783–1787.
6. Akhmedov R., Dumin O., Katrich V. Impulse radiation of antenna with circular aperture. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, vol. 77, pp. 1767–1784.
7. Butrym A.Yu., Zheng Yul., Dumin A.N., Tretyakov O. Transient wave beam diffraction by lossy dielectric half space. *International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2014, pp. 26–28, <https://doi.org/10.1109/MMET.2014.6928717>.
8. Al-Husseini M., Kabalan K., El-Hajj A., Christodoulou Ch. Cognitive radio: UWB integration and related antenna design. Chapt. 20 in book: *New Trends in Technologies: Control, Management, Computational Intelligence and Network Systems* (ed. by. Er Meng Joo), 2010, <https://doi.org/10.5772/293>
9. Tobes Z., Raida Z. Use of the Analog neural networks in the adaptive antenna control systems. *Radioengineering*, 2002, vol. 11, pp. 14–21.
10. Zhao Z., Srivastava A., Peng L., Chen Q. Long short-term memory network design for analog. *Computing ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, 2019, vol. 15, no. 1, article 13, 27 p., <https://doi.org/10.1145/3289393>
11. Hamilton W., Ying R., Leskovec J. Representation learning on graphs: methods and applications. *IEEE Data Engineering Bulletin: Social and Information Networks, Machine Learning*, 2017.
12. Zhang J., Orlik P. V., Sahinoglu Z. et al. UWB systems for wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 2009, vol. 97, pp. 313–331.
13. Kussul E., Baidyk T. Improved method of handwritten digit recognition tested on MNIST database. *Image and Vision Computing*, 2004, vol. 22, pp. 971–981.
14. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-term memory. *Neural Computation*, 1997, vol. 9, pp. 1735–1780.
15. Akhmedov R., Dumin O. Ultrashort impulse radiation from plane disk with uniform current distribution. *2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, 2018, Ukraine, Odessa, pp. 169–173, <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2018.8520223>
16. Wolter M., Yao A. Complex gated recurrent neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018, vol. 31, pp. 10536–10546.

Опис статті для цитування:

Ахмедов Р. Д. Виокремлення корисної інформації з надширокопasmової хвилі у ближній зоні випромінювання. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 3–4, с. 3–10. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.03>

Cite the article as:

Akhmedov R. D. Information extraction from ultrawideband electromagnetic wave in near radiation zone. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, pp. 3–10. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.03>