

© 2005р. В.В. Брайловський, О.Г. Хандожко, В.Г. Федотов,
Є.І. Слинько*

Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Чернівці
*Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства НАН України, Чернівці

ЗАСТОСУВАННЯ АЦП L-761 ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

Розглядається спосіб поліпшення співвідношення сигнал/шум методом часового усереднення із застосуванням комп'ютера *IBM PC* із платою *L761*. Наведена структурна схема установки для проведення експерименту та алгоритми виконання програм для обробки сигналів. Наведені результати виділення з шуму спектрів ЕПР, які отримані при лінійному та нормованому усередненні. Показано, що співвідношення сигнал/шум приблизно пропорційно кореню квадратному від числа, що відповідає кількості розгортки сигналу до значень $N=2000$.

The way of improvement of a signal to noise ratio by a time average method with use of *IBM PC* and an analog-digital converter *L761* is considered. The structure scheme of equipment for fulfillment of experiment and also algorithms of execution of programs for signals processing are given. Results of EPR spectra education from noise are given which are obtained at a linear and normalized average. It is shown, that the signal to noise ratio is approximately proportional to a square root from scans number of a signal up to values $N=2000$.

Часова фільтрація сигналів широко застосовується при експериментальному дослідженні зашумлених спектрів, де процес вимірювання можна багатократно повторювати. Така ситуація легко реалізується, наприклад, у методах стаціонарної радіоспектроскопії.

В даній роботі розглядається спосіб реалізації такого методу для поліпшення співвідношення сигнал/шум при реєстрації спектральних ліній ЯМР та ЕПР. Із цією метою застосовано комп'ютер *IBM PC*, який оснащено АЦП на платі *L-761* виробництва ЗАТ "Л-Кард" [1].

Зауважимо, що в техніці стаціонарної радіоспектроскопії розповсюджені здебільшого два методи виділення сигналу з шуму – частотної і часової фільтрації. Частотний метод базується на теорії оптимальної лінійної фільтрації, коли на основі відомих кореляційних функцій сигналу та шуму відшукують такий лінійний фільтр, який дає мінімальну середньоквадратичну похибку відтворення сигналу. Прикладом реалізації такого методу може бути синхронне детектування доцільне при реєстрації широких спектральних ліній. В цьому випадку частотно перетворений сигнал проходить скрізь вузькосмуговий фільтр із великим значенням постійної часу τ . Поліпшення співвідношення сигнал/шум досягається

шляхом збільшення постійної часу τ з одночасним збільшенням часу розгортки T резонансного спектра при постійному відношенні τ/T [2].

Метод часової фільтрації, або усереднення ґрунтується на теорії статистичних рішень. В ньому загальний час вимірювання вибирається таким, що дорівнює T , але ділиться на N інтервалів і здійснюється N проходів розгортки при збереженні відношення τ/N . Широкошмугові сигнали усіх N розгортки підсумовуються, внаслідок чого створюється сумарний сигнал з амплітудою в N разів більшою від парціальної [2].

При наявності некорельованого ("білого") шуму обидва методи еквівалентні: за один і той самий час вимірювання вони повинні дати однакоє співвідношення сигнал/шум [3]. В реальному випадку методу синхронного детектування притаманні суттєві недоліки. По перше – необхідність додаткової модуляції фізичного ефекту, що не завжди прийнятно, оскільки реєструється вже спотворений модуляцією спектр. По-друге – така фільтрація ефективно послаблює тільки високочастотні складові, але зовсім не придушує низькочастотні шуми типу $1/f$. Порівняно з цим, перевагами другого методу є однакоє послаблення як високочастотних, так і низькочастотних шумових компонент при повному збереженні

широкосмуговості сигналу, який не спотворюється при накопиченні спектра.

Для практичної реалізації методу часової фільтрації раніше використовували амплітудні багатоканальні аналізатори спектра. Пізніше з'явилися спеціалізовані пристрої – аналізатори-накопичувачі типу Ф36, які базуються також на принципі багатоканального накопичення [4]. Останні характеризуються обмеженим ресурсом команд і мають застарілий інтерфейс, що ускладнює стикування приладу із сучасними обчислювальними засобами.

На рис. 1 наведена структурна схема установки для реалізації методу часової фільтрації, яка була застосована при вивченні спектрів ЕПР у напівпровідникових матеріалах, легованих парамагнітними домішками.

В даній схемі синхронізація роботи радіоспектрометра та плати АЦП здійснюється за допомогою генератора імпульсів Г5-54. Осцилограф С1-83 необхідний для поточного візуального контролю нефільтрованої суміші сигналу та шуму на виході спектрометра ЕПР. За допомогою підсилювача У7-1 здійснюється узгодження рівнів за напругою між виходом радіоспектрометра та входом АЦП карти L-761B. Крім того, цей підсилювач дає змогу реалізувати на вході цифрового перетворювача оптимальний фільтр із тим, щоб найбільш ефективно використати накопичення сигналу при збереженні ймовірної форми спектра.

Застосована карта L-761B виконана на базі сигнального процесора (DSP) фірми Analog Devices, Inc. ADSP-2185, має АЦП з розрядністю 14 біт і максимальною частотою дискретизації 125 кГц. При цьому він має 16 диференційних або 32 входи з загальною землею, 2 входи для цифрової синхронізації. Завдяки наявності внутрішнього підсилювача з коефіцієнтами підсилення 1, 4, 16, 64 діапазон вхідних напруг відповідно становить $\pm 5B, \pm 1,25B, \pm 0,3125B, \pm 0,078B$.

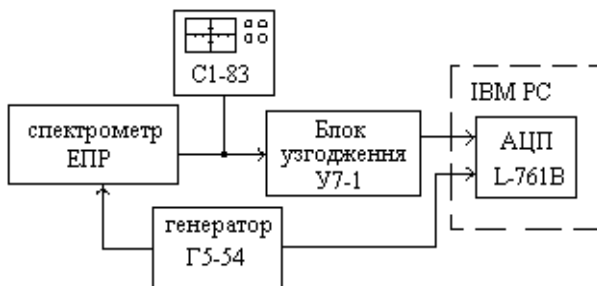


Рис. 1. Структурна схема для реалізації часової фільтрації при спостереженні спектрів ЕПР

У програмне забезпечення входить стандартний набір бібліотек функцій та процедур, що дозволяє при створенні програм, крім мов низького рівня, використовувати мови C++ та Delphi [1].

Для поліпшення співвідношення сигнал/шум при реєстрації спектрів ЕПР була розроблена програма, яка забезпечує введення та обробку сигналу за допомогою плати L-761B. Слід зауважити, що декілька програмних продуктів для роботи з даною платою постачаються разом із нею, але вони або не можуть проводити накопичення сигналу в часі, або представлені у вигляді демонстраційних версій.

Розроблена нами програма написана на Delphi 5.5 під Windows 9x. Вона дозволяє виводити на екран монітора одночасно будь-які три канали з 16 існуючих. При цьому можна використовувати один із режимів: поточний показ вхідних сигналів, відображення сигналів під час накопичення, показ суми або різниці усереднених сигналів. Ці режими задаються користувачем за допомогою інтерфейсу.

Під час роботи програми в пам'яті сигнального процесора плати створюється малий кільцевий буфер (МКБ) розміром F байт та два великих ВКБ-1 і ВКБ-2 в пам'яті комп'ютера розміром, який дорівнює p частинам буферу МКБ. Коли починається збір даних, то спочатку заповнюється МКБ, після чого генерується переривання і дані переписуються в незаповнену частину ВКБ-1. Якщо заповнюється ВКБ-1, то відповідно до заданого режиму виведення на екран монітора виконується той чи інший алгоритм для кожного з трьох каналів окремо, після чого все починається спочатку. У ВКБ-2 зберігаються дані, отримані внаслідок виконання алгоритмів усереднення чи підсумовування (різниці).

Дані в ВКБ-1 і ВКБ-2 є фактично цілочисельними двобайтними одномірними масивами даних D і D_1 , в яких значення напруг на трьох каналах (назвемо їх A, B, C) ідуть періодично один за одним по кожній окремій i -й вибірці, тобто $A_0, B_0, C_0, A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, \dots, A_i, B_i, C_i, \dots, A_m, B_m, C_m$, де $m=pF/6$.

Усереднення в часі може здійснюватися за одним з двох алгоритмів: звичайне лінійне або нормоване підсумовування з поступовим виведенням результатів на екран монітора.

Розглянемо детально режим усереднення по часу за допомогою алгоритму лінійного підсумовування. В його основу покладена таке співвідношення [4]:

$$M = \sum_{k=1}^N x(t_k + iT_0), \quad (1)$$

де t_k – початок відліку, T_0 – інтервал часу між вибірками, дискретних значень розгортки $x(t)$, N – кількість розгортки (всі цикли накопичення), i – поточне значення вибірки, k – поточне значення розгортки, $x(t_k + iT_0)$ – дискретне значення реалізації на i -ій вибірці.

Сам алгоритм зображений на рис. 2. Пояснимо його роботу. Спочатку перевіряється значення розгортки k , чи воно менше N . Якщо ні, то проходить зміна режиму виведення на екран монітора на безпосередній показ даних із ВКБ-2. Даний

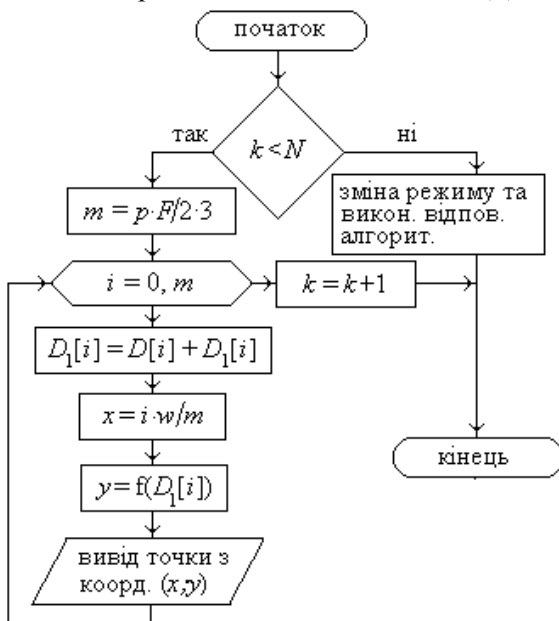


Рис. 2. Алгоритм лінійного усереднення

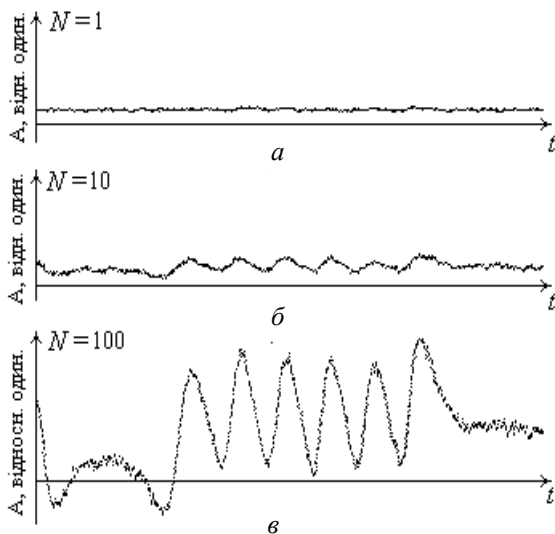


Рис. 3. Результат лінійного усереднення в часі сигналу ЕПР домішкових іонів Mn^{2+} у напівпровідникової сполуці $PbTe$ при $N=1$ (а), 10 (б), 100 (в)

алгоритм усереднення більше не буде виконуватися доти, поки користувач не змінить режим. Якщо ж зазначена умова справедлива, то починається виконання циклу, де i пробігає від 0 до m .

В цьому циклі, крім підсумовування значень на даній та попередній розгортці при однаковій виборці, визначаються координати точки (x, y) в графічній області (частині екрана монітора, куди виводяться сигнали), яка має ширину w . Після закінчення циклу виконується збільшення значення розгортки на одиницю та починається новий збір даних у ВКБ-1.

На рис. 3 зображений вигляд сигналу при значеннях $N=1, 10, 100$ (відповідно криві а, б, в). При одному проході розгортки рівень сигналу настільки малий, що знаходиться на рівні шумів (рис. 3,а). Але вже при $N=10$ сигнал помітно перевищує рівень шумів, а при $N=100$ він досить чітко виявляється. Даний сигнал відповідає спектру ЕПР домішкових іонів Mn^{2+} у $PbTe$.

Проте алгоритму лінійного усереднення притаманний суттєвий недолік – швидке переповнення розряду комірки пам'яті внаслідок того, що вона становить 2 байти. Крім того, при наявності постійної складової в шумовому спектрі спостерігається неперервне переміщення базової лінії вгору разом із корисним сигналом.

Вказані недоліки усуваються при нормованому усередненні сигналу. В цьому випадку в процесі накопичення поточної оцінки середніх значень ординат вхідного сигналу, який складається з корисного сигналу та шуму, можна спостерігати на екрані монітора нормований сигнал, який "звільнюється" від випадкової складової (рис. 4) при нерухомій базовій лінії.

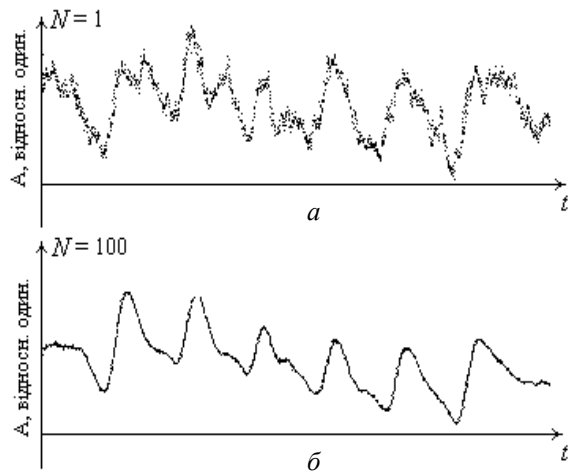


Рис. 4. Результат нормованого усереднення по часу сигналу ЕПР Mn^{2+} у $Pb_{1-x}Ge_xTe$ при $N=1$ (а), 100 (б)

В його основу покладено рекурентний алгоритм [4]:

$$M_k^i = M_{k-1}^i + \frac{f(t_k + iT_0) - M_{k-1}^i}{2^n}, \quad (2)$$

де N – кількість повторень розгортки, M_k^i , M_{k-1}^i – поточні значення середнього за результатами k і $k-1$ проходів, k – поточне значення розгортки, яке пробігає від 0 до N , n – значення степеня, яке дорівнює 0 або 1, якщо $k=1$ або 2, інші n вибираються з нерівності

$$3 \cdot 2^{n-2} - 1 < k < 3 \cdot 2^{n-1}. \quad (3)$$

Даний алгоритм зображений на рис. 5. Як видно, він працює практично аналогічно попередньому, крім двох моментів: усереднення проводиться за рекурентною формулою, в якій n вибирається згідно з нерівністю (3).

Слід зауважити, що даний алгоритм дозволяє відстежити порівняно повільні зміни синхронного сигналу. При цьому постійна часу згладжування визначається коефіцієнтом нормування 2^n .

Відомо, що у випадку білого шуму закон пропорційності відношення сигнал/шум кореню квадратному з N виконується завжди, оскільки білий шум некогерентний і не може здійснювати жодних кореляційних ефектів між послідовними розгортками. У випадку небілого шуму – при достатньо великій кількості розгортки закон зміни чутливості наближається до \sqrt{N} [3].

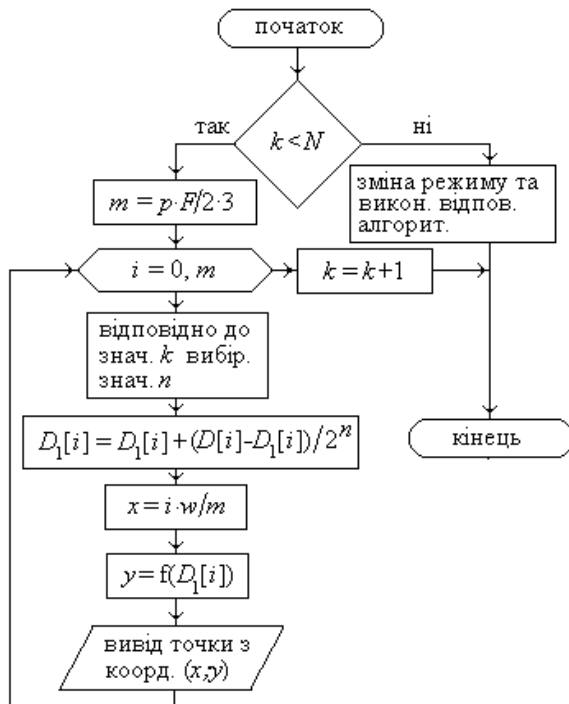


Рис. 5. Алгоритм нормованого усереднення

Для перевірки виконання закону \sqrt{N} були проведені виміри співвідношення сигнал/шум при різних значеннях N . Результат проведеного експерименту показаний на рис. 6. Як бачимо, є відмінність експериментальної залежності від теоретичної кривої. На нашу думку, вона пов'язана з відхилом розподілу шуму від "білого" та похибкою при визначенні середньоквадратичного значення рівня шуму.

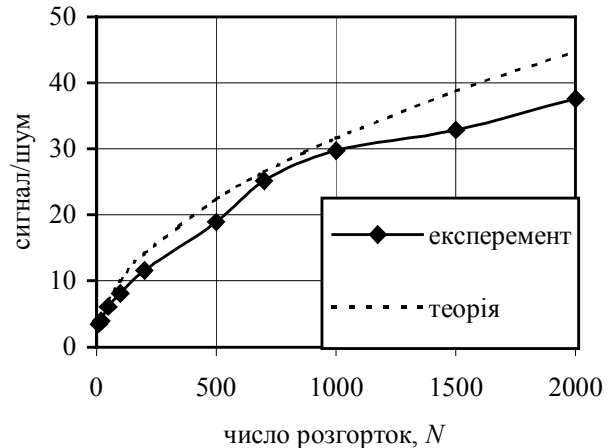


Рис. 6. Експериментальна та теоретична залежності співвідношення сигнал/шум від кількості розгортки

Робота підтримана НТЦУ (проект №2369).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Платы L-761, L-780 и L-783. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЗАО "Л-кард" (<http://www.lcard.ru>), 1999.
2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. – М.: Мир, 1983. – Том 1,2.
3. Эрст Р.П. Повышение чувствительности в спектроскопии магнитного резонанса. 1. Анализ метода усреднения по времени // Приб. для науч. исслед. – 1965. – №12. – С.3-12.
4. Измерительно-вычислительный комплекс Ф36. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Краснодар: ЗИП, 1986.