

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.96 : 519.852.6

А.М. Вагапов, к.т.н., с.н.с.

Житомирський філіал Харківського авіаційного інституту

О.М. Кубрак, викл.

А.В. Парфенюк, курсант

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки імені С.П. Корольова

## АЛГОРИТМ ДЕМОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ

Пропонується алгоритм демодуляції сигналів, за допомогою якого можна визначити закони зміни частоти, амплітуди та фази квазігармонічних сигналів. Особливістю застосування даного алгоритму є реальний масштаб отримання інформації, повна апріорна невизначеність про параметри аналізованого сигналу та простота реалізації. Наводяться результати обробки сигналів з основними законами модуляції та їх аналіз, отримані методом математичного моделювання.

Задача визначення виду модуляції квазігармонічних сигналів, особливо для радіотехнічних засобів (РТЗ), призначених для ведення розвідки та контролю радіоелектронної обстановки, є однією із пріоритетних. Це пояснюється тим, що під час прийому та обробки радіосигналів правильність демодуляції визначає правильність виділення інформації (повідомлення) із сигналу [6, 7, 8].

Демодуляція радіосигналів, які являють собою адитивну або мультиплікативну суміш квазігармонічних складових для РТЗ, залишається актуальною і до кінця не вирішеною задачею. Для цього застосовують різні види аналогових та цифрових дискримінаторів, застосування яких обмежується конкретними видами модуляції сигналів. Таким чином, задача демодуляції з подальшим декодуванням вирішується не завжди якісно, а інколи і зовсім не вирішується вказаними РТЗ [8]. Особливо для тих, які здійснюють прийом та обробку радіосигналів різної модуляції.

Пропонується вирішити дану задачу шляхом застосування алгоритму демодуляції, який дасть змогу одночасно визначити закони зміни амплітуди, частоти та фази прийнятого сигналу в реальному масштабі часу.

Розробка алгоритму базується на основі гармонічного аналізу сигналів з використанням функціонального аналізу комплексної змінної [1, 4, 6, 7].

Вхідний сигнал (в комплексному вигляді) можна представити в таким чином [4, 6, 7]:

$$\begin{aligned}\dot{C}(t) &= s(t) + js^{\perp}(t) = a(t) \exp \{j2\pi f(t)t + \varphi(t)\}, \\ s(t) &= a(t) \cos [2\pi f(t)t + \varphi(t)], \\ s^{\perp}(t) &= a(t) \sin [2\pi f(t)t + \varphi(t)],\end{aligned}\tag{1}$$

де  $\dot{C}(t)$  – вхідний сигнал в комплексному вигляді;  $s(t)$ ,  $s^{\perp}(t)$  – дійсна та уявна частини комплексного вхідного сигналу відповідно;  $a(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\varphi(t)$  – закон зміни амплітуди частоти та фази сигналу в часі відповідно;  $\perp$  – знак квадратурної складової сигналу;  $\pi = 3.1415\dots$  – постійна;  $t$  – поточний час.

Якщо сигнал  $\dot{C}(t)$  затримати в часі на інтервал  $\tau$ , за допомогою лінії затримки, то формулу (1) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{C}(t + \tau) &= s(t + \tau) + js^{\perp}(t + \tau) = a(t + \tau) \exp \{j2\pi f(t + \tau)(t + \tau) + \varphi(t + \tau)\} = \\ &= \dot{C}(t) \exp \{j2\pi f(t)\tau\}.\end{aligned}\tag{2}$$

В результаті аналізу виразу (2) можна зробити висновок, що сигнал  $\dot{C}(t + \tau)$  відрізняється від  $\dot{C}(t)$  множителем  $\exp \{j2\pi f(t)\tau\}$ , який містить в собі закон зміни частоти сигналу  $f(t)$ .

Визначення закону зміни частоти сигналу

З метою визначення закону зміни частоти сигналу виконується ділення затриманого, на певний інтервал часу  $\tau$ , сигналу  $\dot{C}(t + \tau)$  на незатриманий сигнал  $\dot{C}(t)$ , причому  $f(t) \leq 2/\tau$ . В результаті ділення отримуємо комплексний множник  $\exp \{j2\pi f(t)\tau\}$ , який містить в собі закон зміни частоти сигналу  $f(t)$ .

$$\frac{\dot{C}(t + \tau)}{\dot{C}(t)} = \exp \{j2\pi f(t)\tau\},$$

звідки

$$f_o(t) = \frac{1}{2\pi\tau} \arg \left[ \frac{\dot{C}(t+\tau)}{\dot{C}(t)} \right]. \quad (3)$$

Визначення закону зміни амплітуди сигналу

Для визначення закону зміни амплітуди сигналу вираз (1) представимо у вигляді [1, 7]:

$$\begin{aligned} \dot{C}(t) &= a(t) \exp \{j2\pi f(t)t + \varphi(t)\} = a(t) \exp \{j\varphi(t)\} \exp \{j2\pi f(t)t\} = \\ &= \dot{U}(t) \exp \{j2\pi f(t)t\}, \end{aligned}$$

де  $\dot{U}(t) = a(t) \exp \{j\varphi(t)\}$  – комплексний множник який характеризує закони зміни амплітуди та фази сигналу, який можемо визначити, знаючи значення комплексного множника  $\exp \{j2\pi f(t)\tau\}$  за формулою:

$$\dot{U}(t) = \frac{\dot{C}(t)}{\exp \{j2\pi f(t)t\}} = a(t) \exp \{j\varphi(t)\}. \quad (4)$$

Визначивши модульне значення  $\dot{U}(t)$ , визначаємо закон зміни амплітуди сигналу в часі, в результаті маємо:

$$a(t) = |\dot{U}(t)|. \quad (5)$$

Визначення закону зміни фази сигналу

Для визначення закону зміни фази сигналу необхідно визначити аргумент комплексної функції (4), що можна представити у вигляді:

$$\varphi(t) = \arg \{ \dot{U}(t) \}. \quad (6)$$

Таким чином, на основі двох вимірів комплексного сигналу здійснено одиничну (точкову) оцінку  $a(\tau)$ ,  $f(\tau)$ ,  $\varphi(\tau)$ , продовжуючи аналіз сигналу на всьому інтервалі спостереження, отримаємо залежності зміни його амплітуди, частоти та фази в часі  $a(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\varphi(t)$ .

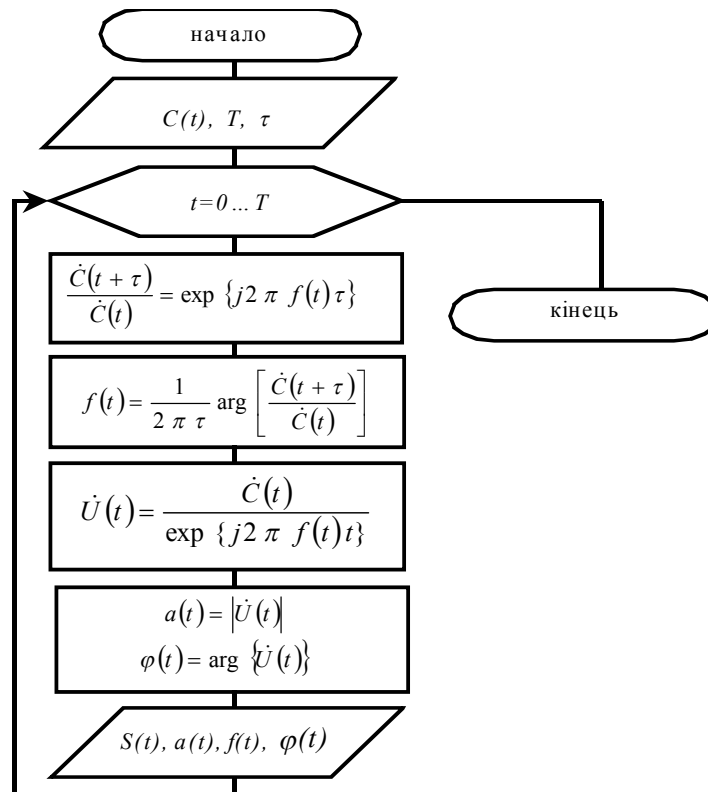


Рис. 1. Схема алгоритму демодуляції сигналів

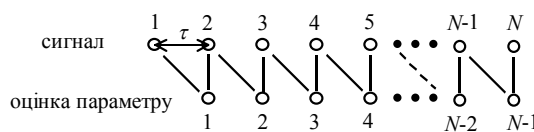


Рис. 2. Процес отримання точкових оцінок параметрів цифрового сигналу.

Особливостями розробленого алгоритму демодуляції є:

кількість точкових оцінок буде на один менше за кількість відліків сигналу тому, що при першому визначенні параметрів використовується два відліки сигналу, як показано на рис.2;

необхідна апіорна інформація про параметри РТЗ, а точніше тривалість затримки сигналу  $\tau$ , яка повинна бути константою.

Даний алгоритм пропонується реалізувати на прикладі пасивного РТЗ в двох варіантах. Перший варіант – за допомогою аналогових пристроїв (рис. 3), другий – на основі цифрового спеціального обчислювального пристрою (рис. 4). В другому випадку в формулах (1-6) слід провести заміну в позначаннях:  $t$  замінити на  $nT_d$  та  $\tau$  на  $T_d$  ( $n = 1 \dots N$ ,  $n$  – номер дискрети сигналу,  $N$  – кількість дискрет сигналу,  $T_d$  – інтервал дискретизації).

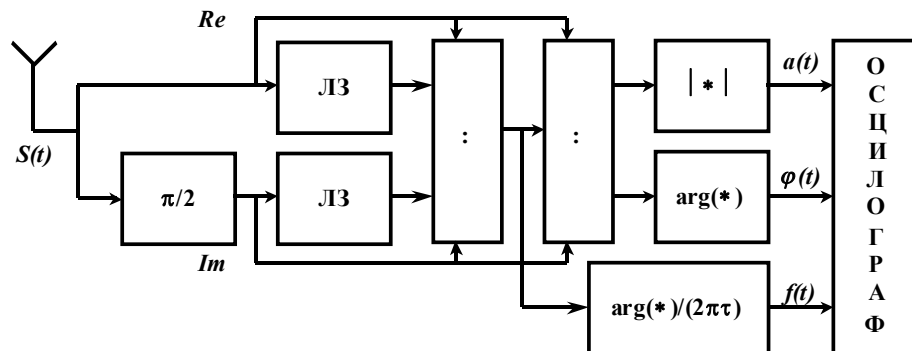


Рис.3. Схема реалізації алгоритму демодуляції (аналоговий варіант).

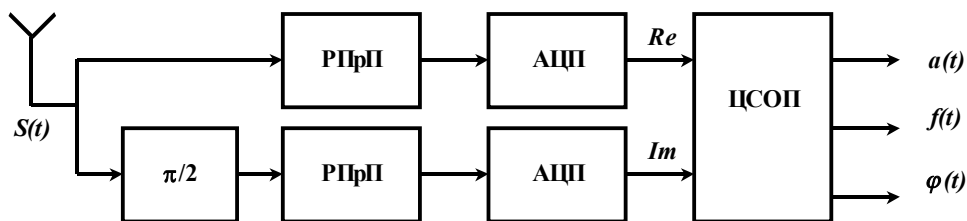


Рис.4. Схема реалізації алгоритму демодуляції (цифровий варіант).

Скорочення, які використані на рис. 3 та рис. 4:

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЛЗ – лінія затримки;

РПрП – радіоприймальний пристрій;

ЦСОП – цифровий спеціальний обчислювальний пристрій;

arg(\*) – пристрій визначення аргументу комплексної величини;

arg(\*)/(2πτ) – пристрій визначення аргументу комплексної величини і ділення на константу 2πτ;

π/2 – фазоповертач на 90°;

: – пристрій, який реалізує операцію ділення комплексних сигналів;

|\*| – пристрій визначення модуля комплексної величини;

Re, Im – реальна та уявна (квадратурна складова) частини комплексного сигналу.

З метою перевірки правильності функціонування запропонованого алгоритму проведені теоретичні дослідження методом математичного моделювання за допомогою ПЕОМ. Для цього розроблено спеціальне програмне забезпечення, за допомогою якого здійснено моделювання вхідних сигналів різної модуляції та їх обробку алгоритмом демодуляції сигналів.

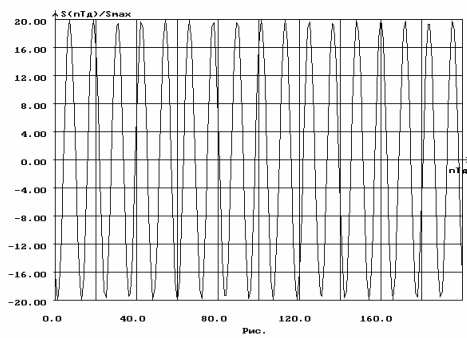
Початкові умови при моделюванні:  $\tau \sim T_d = 1/F_d = 1$  – тривалість затримки сигналу (для аналогової схеми) або період дискретизації (для цифрової схеми);  $f = 0.01 \dots 0.20$  – межі значень відносної частоти сигналу (відносно частоти дискретизації  $F_d$ );  $a = 0.1 \dots 10.0\text{В}$  – межі значень амплітуди сигналу;  $U_{ш} = 0.1\text{В}$  – значення середньоквадратичного відхилення амплітуди внутрішнього шуму приймача;  $\phi_0 = 0 \dots 360^\circ$  – межі значень початкової фази сигналу;  $\varphi = 0 \dots 360^\circ$  – межі значень зміни фази сигналу;  $BCШ = 1 \dots 100$  – відношення амплітуди сигналу до середньоквадратичного відхилення амплітуди внутрішнього шуму (BCШ). За внутрішній шум використано нормальний гаусівський шум (математичне очікування дорівнює нулю).

Деякі результати досліджень наведені на рис. 5 – рис. 7 в такій послідовності:

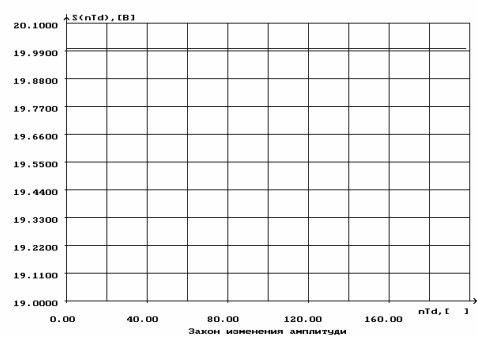
а) вид аналізованого сигналу  $s(t)$ ;

б) закон зміни амплітуди сигналу в часі  $a(t)$ ;

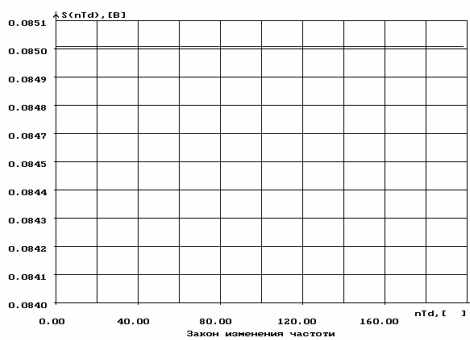
- в) закон зміни частоти сигналу в часі  $f(t)$ ;
- з) закон зміни фази сигналу в часі  $\varphi(t)$ .



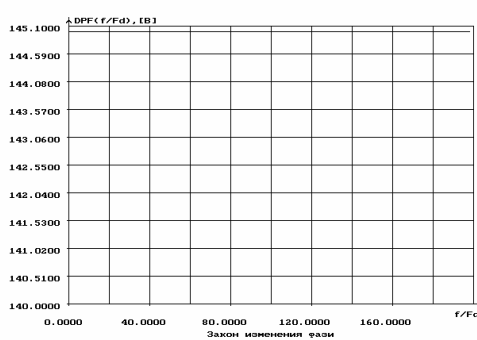
а)



б)

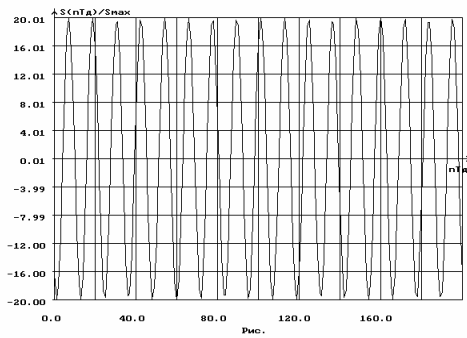


в)

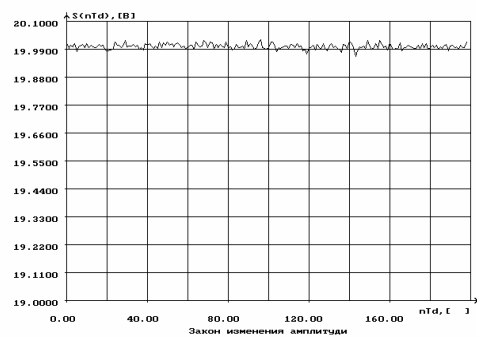


з)

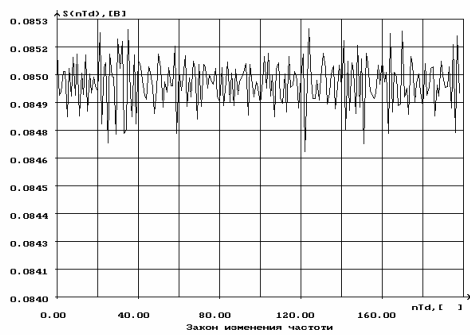
Рис. 5. Сигнал – простий радіоімпульс з параметрами,  $U = 20V, f = 0.085, \varphi_0 = 145^\circ, N = 200, ВСШ = 100$  та результати його демодуляції



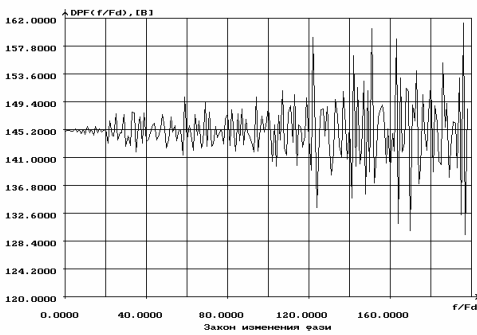
а)



б)



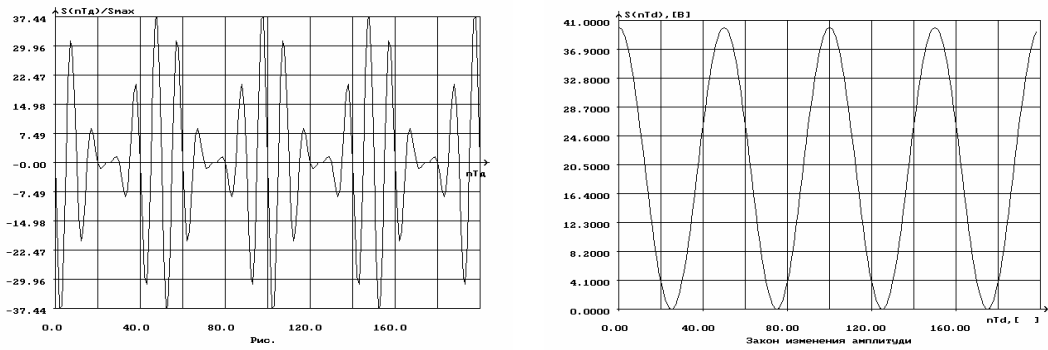
в)



з)

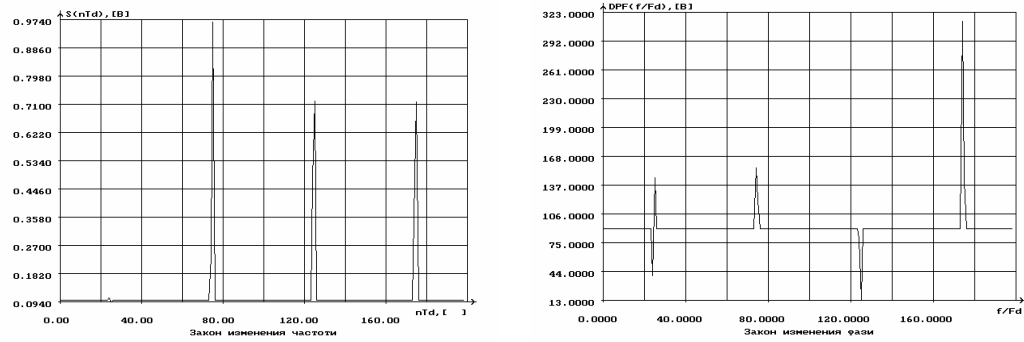
Рис. 6. Сигнал – простий радіоімпульс з параметрами,

$U = 20V, f = 0.085, \varphi_0 = 145^\circ, N = 200, \text{BCШ} = 15$  та результати його демодуляції



а)

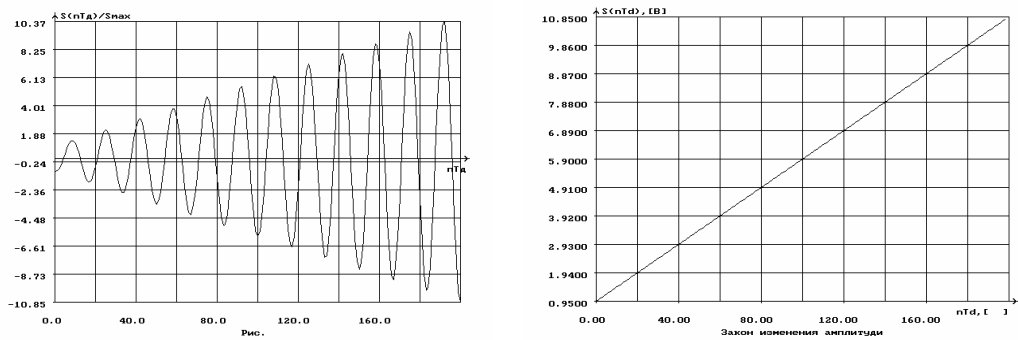
б)



в)

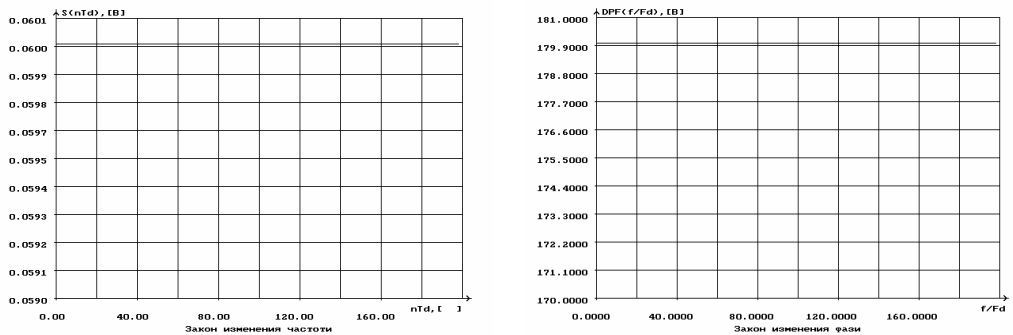
г)

Рис. 7. Сигнал – АМ радіоімпульс з параметрами,  
 $U = 20V, f = 0.1, \varphi_0 = 90^\circ, N = 200, \text{BCШ} = 100$  та результати його демодуляції



а)

б)



в)

г)

Рис. 8. Сигнал – АМ радіоімпульс з параметрами,  
 $U = 20V, f = 0.1, \varphi_0 = 180^\circ, N = 200, \text{BCШ} = 100$  та результати його демодуляції

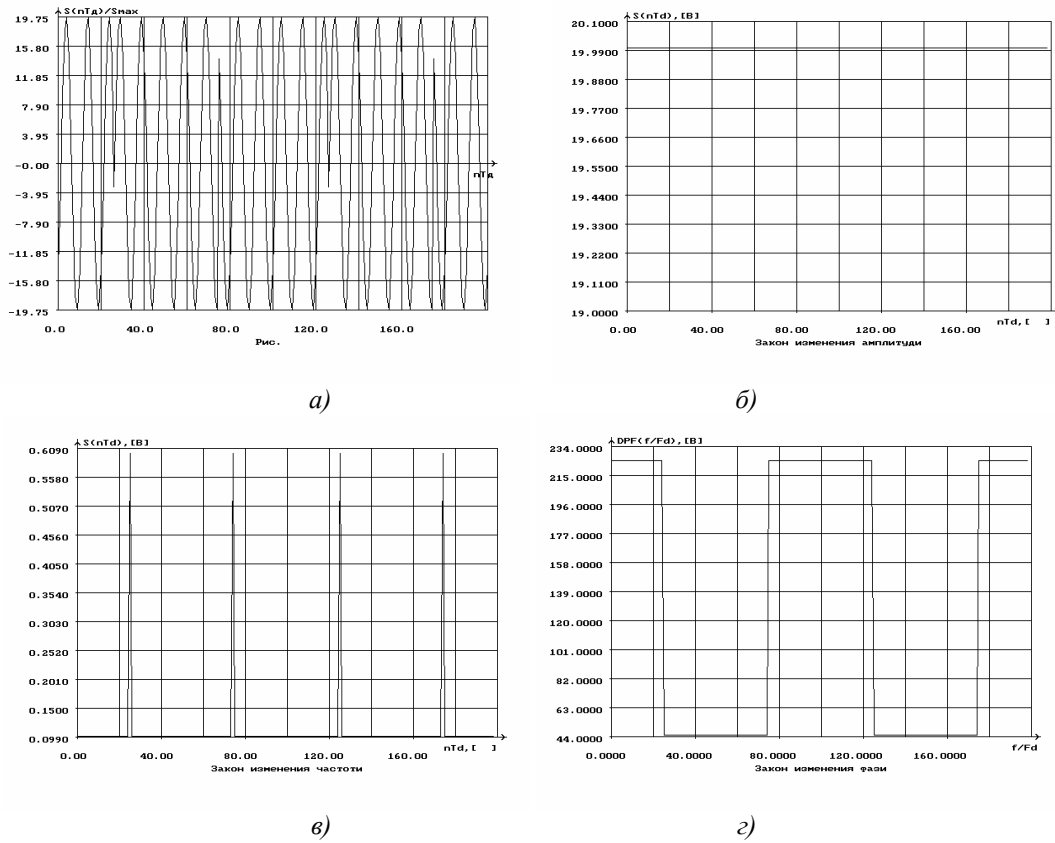


Рис. 9. Сигнал – кодо-фазомодульований радіоімпульс з параметрами,  $U = 20V$ ,  $f = 0.099$ ,  $\varphi_0 = 245^\circ$ ,  $N = 200$ ,  $BCШ = 100$ ,  $\Delta\varphi = \pi$ , та результати його демодуляції

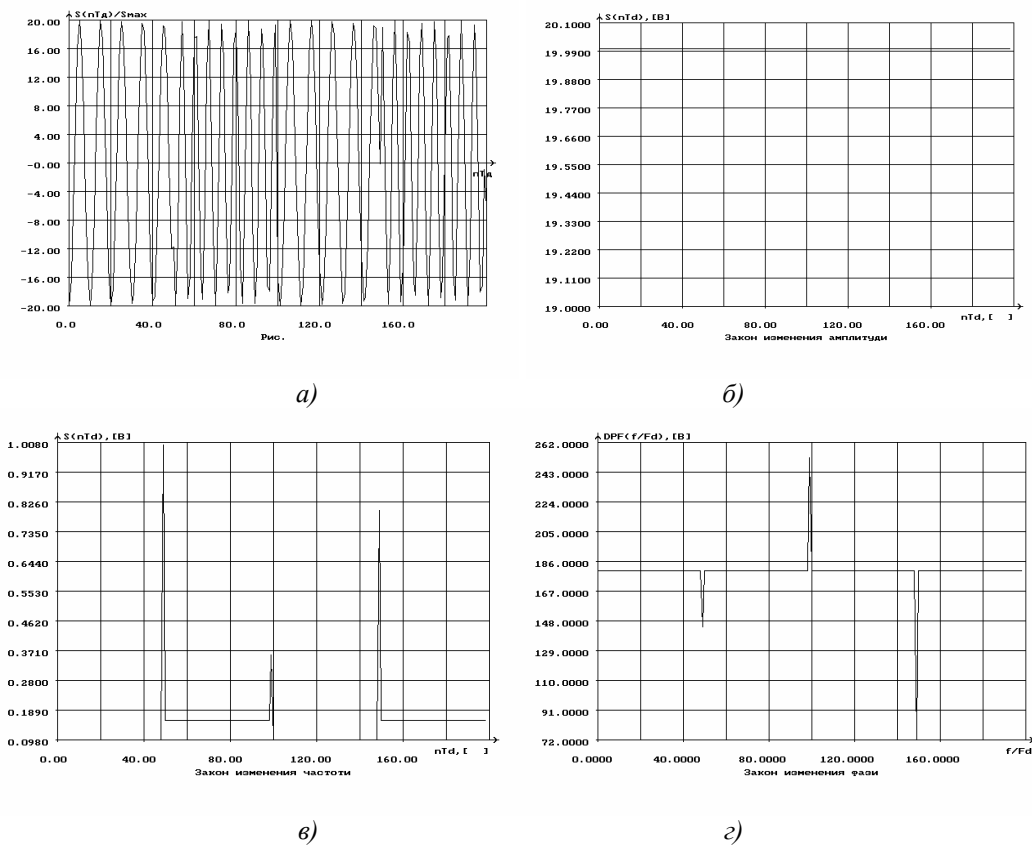


Рис. 10. Сигнал – кодо-імпульсноманіпульований частотномодульований з параметрами,

$U = 20B, f_o = 0.099, f_1 = 0.121, \varphi_o = 180^\circ, N = 200, \text{ВСШ} = 100$ , та результати його демодуляції

Для глибокого аналізу обрано простий радіоімпульс, з тієї причини, що його параметри при наявності внутрішнього шуму є ергодичними випадковими процесами, і статистичний аналіз можна провести за класичною схемою [1, 2, 3, 5]. Узагальнені результати аналізу алгоритму демодуляції, на прикладі простого радіоімпульсу, де амплітуда, частота та фаза сигналу не змінюються, наводяться деякі його статистичні залежності (рис. 11, рис. 12).

На рис. 10 представлено залежності відносних помилок оцінки амплітуди, частоти та фази від ВСШ, які обчислені за формулою [1, 5]:

$$\Delta = \frac{|\mathcal{X} - X_0|}{\Delta_{\max}}, \tag{7}$$

де  $\mathcal{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$  – середнє значення параметра (амплітуди, частоти або фази), отримане за результатами обробки масиву  $N$  вимірів;  $X_0$  – дійсне значення параметра (амплітуди, частоти або фази) згідно з умовами моделювання;  $\Delta_{\max} = \max\{|\mathcal{X} - X_0|\}$  – максимальне значення абсолютної помилки оцінки параметра (амплітуди, частоти або фази).

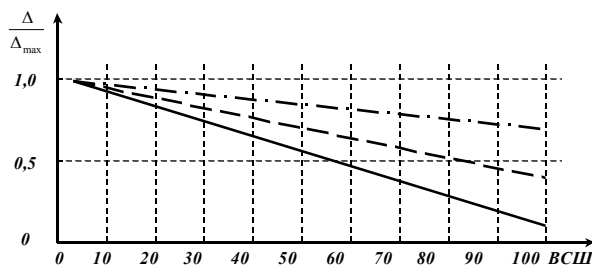


Рис. 11. Залежності відносних помилок оцінки параметрів простого радіоімпульсу від ВСШ: безперервна лінія – амплітуди; штрихова лінія – частоти; штрих-пунктирна лінія – фази.

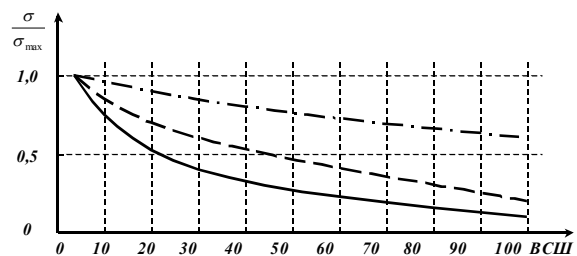


Рис. 12. Залежності відносних середньоквадратичних помилок оцінки параметрів простого радіоімпульсу від ВСШ: безперервна лінія – амплітуди; штрихова лінія – частоти; штрих-пунктирна лінія – фази

На рис. 12 наведено залежності відносних середньоквадратичних помилок оцінки амплітуди, частоти та фази від ВСШ, які обчислені за формулою [1, 5]:

$$\sigma = \frac{\sqrt{D}}{\sigma_{\max}}, \tag{8}$$

де  $D = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\mathcal{X} - X_0)^2$  – дисперсія параметра (амплітуди, частоти або фази), отримана за результатами обробки масиву  $N$  вимірів;  $\sigma_{\max} = \max\{\sigma\}$  – максимальне значення середньоквадратичної помилки оцінки параметра (амплітуди, частоти або фази).

**Висновки:**

- при збільшенні відношення сигнал/шум точність результатів демодуляції покращується;
- чим складніший закон модуляції сигналу, тим більше обмежуються можливості алгоритму;
- алгоритм дуже чутливий до різких змін параметрів сигналу, це є як позитивним (виявлення різкої зміни параметра), так і негативним (аномальні оцінки) ефектом;
- точність оцінки фази найбільш чутлива щодо відношення сигнал/шум.

Розроблений алгоритм демодуляції може бути використаний в РТЗ, за допомогою яких здійснюється прийом та демодуляція сигналів, що мають різні види модуляції, зокрема в пасивних радіолокаційних засобах, засобах радіозв'язку та інших.

**Рекомендації щодо застосування:**

- алгоритм слід застосовувати при обробці сигналів, які містять адитивні або мультиплікативні гармонічні складові;
- при використанні даного алгоритму слід пам'ятати про необхідність виконання умов та обмежень гармонічного аналізу функцій комплексної змінної;
- алгоритм слід застосовувати при високих відношеннях сигнал/шум.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
2. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с
3. *Сверхбольшие интегральные и совершенная обработка сигналов: / Пер. с англ. / Под ред. С.Гуна. / Х.Уайтхауса, Т.Кайлата.* – М.: Радио и связь, 1979. – 472.
4. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.
5. *Куприянов М.С., Матюшин Б.Д.* Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб.: Политехника, 1998. – 592 с.
6. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Александрова. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
7. *Лезин Ю.С.* Введение в теорию и технику радиотехнических систем : Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 280 с.
8. *Вартаняян В.А.* Радиоэлектронная разведка. – М.: Воениздат, 1991. – 254 с.

ВАГАПОВ Асрлан Мінгазович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, викладач Харківського авіаційного інституту.

Наукові інтереси:

- адаптивна обробка радіосигналів алгоритмами нелінійного цифрового спектрального аналізу;
- моделювання радіотехнічних засобів.

КУБРАК Олександр Миколайович – викладач Житомирського військового інституту радіоелектроніки імені С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка та аналіз радіосигналів;
- моделювання радіотехнічних засобів.

ПАРФЕНЮК Андрій Васильович, курсант Житомирського військового інституту радіоелектроніки імені С.П. Корольова

Наукові інтереси:

- цифрова обробка радіосигналів;
- комп'ютерні системи та програмування.

Подано 23.03.2002



**Вагапов А.М., Кубрак О.М., Парфенюк А.В.** Алгоритм демодуляції сигналів  
**Вагапов А.М., Кубрак А.Н., Парфенюк А.В.** Алгоритм демодуляції сигналів  
**Vagapov A.M., Kubrak O.M., Parfenuk A.V.** The algorithm of demodulation of signals

УДК 621.396.96 : 519.852.6

**Алгоритм демодуляції сигналів / А.М. Вагапов, А.Н. Кубрак, А.В. Парфенюк**

Предлагается алгоритм демодуляции сигналов, с помощью которого можно определять законы изменения частоты, амплитуды и фазы квазигармонических сигналов. Особенностью применения данного алгоритма есть реальный масштаб времени получения информации, полная априорная неопределенность о параметрах анализируемого сигнала и простота реализации. Приводятся результаты обработки сигналов основных законов модуляции и их анализ, полученные методом математического моделирования.

УДК 621.396.96 : 519.852.6

**The algorithm of demodulation of signals / A. M. Vagapov, O.M. Kubrak, A.V. Parfenuk**

The algorithm of demodulation of signals is offered, with which help it is possible to determine the laws of change of frequency, amplitude and phase harmonically of signals. The feature of application of the given algorithm is a real time scale of reception of the information, complete apriority uncertainty about parameters of an analyzed signal and simplicity of realization. The results of processing of signals of the basic laws of modulation and their analysis received by a method of mathematical modeling are resulted.