

## ХАРАКТЕР ТА СИМЕТРІЯ ФУНКЦІЙ ПРАВДОПОДІБНОСТІ ПРИ ДЕМОДУЛЯЦІЇ ШУМОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ В МОБІЛЬНІЙ РОБОТОТЕХНІЦІ

*Метою роботи було встановлення характеру та наявності симетрії функцій правдоподібності на виході демодулятора при опрацюванні широкосмугових сигналів з керованою ентропією. Результати отримано шляхом моделювання в обчислювальному експерименті. Встановлено, що функції правдоподібності сигналів мають дзвоновидний гаусів вигляд та є симетричними.*

*Ключові слова: широкосмуговий сигнал, змінна ентропія, демодуляція, функція правдоподібності, мобільний робот, розподілена система оброблення інформації, телекомунікаційна система.*

M. I. KOZLENKO

State Higher Educational Institution "Vasyl Stefanyk Precarpathian National University"

## THE CHARACTER AND SYMMETRY OF THE LIKELIHOOD FUNCTIONS OF THE SPREAD SPECTRUM SIGNALS DEMODULATION IN MOBILE ROBOTICS

*Abstract - The purpose of the work is to obtain the probability distribution and symmetry of the likelihood functions of the variable entropy spread spectrum signals demodulation. The results have been obtained by the modelling experiments. It has been proved that the likelihood functions at the demodulator output are symmetrical and distributed normally. The obtained results prove the feasibility of using variable entropy spread spectrum signals data exchange method in the mobile robotics and give the way to build effective symbol detection tools.*

*Keywords: spread spectrum signal, variable entropy, demodulation process, likelihood function, mobile robotics, distributed information processing system, telecommunication system.*

### Вступ

Розвиток сучасних інформаційних технологій все частіше вимагає застосування територіально розподіленого опрацювання інформації. Умовою створення якісних розподілених систем оброблення інформації є побудова простих та надійних засобів обміну даними, у тому числі й бездротових. Існує велика кількість застосувань, що вимагають надійної передачі даних, живучості системи в складних умовах при дії інтенсивних завад природного, техногенного та іншого походження за низьких відношень сигнал/завада з необхідною відстанню порядку одиниць або десятків кілометрів. Це системи екологічного моніторингу, інші системи збирання даних де вимоги щодо швидкості обміну даними, як правило, можуть бути знижені до величин порядку сотень або тисяч біт за секунду. Особливо гостро стоїть проблема створення надійного каналу зв'язку для передачі телеметричної інформації та команд керування в робототехніці при організації зв'язку з віддаленими автономними мобільними роботами. Найчастіше задачі створення згаданих телекомунікаційних систем вирішуються шляхом побудови традиційних каналів обміну даними, у яких застосовуються прості сигнали-носії з малою базою, найпоширенішими з яких є сигнали безпосереднього низькочастотного представлення дискретних повідомлень та гармонійні сигнали, модульовані чи маніпульовані у відповідності до вихідного повідомлення. Проте не завжди такий підхід задовольняє сучасним вимогам, зокрема, за такими показниками як надійність, простота апаратної реалізації, стабільність характеристик, можливість обміну даними при малих відношеннях сигнал/завада тощо. Одним з перспективних шляхів розвитку обміну даними є використання сигналів з великою базою, зокрема, з розширеним спектром, що може стати основою забезпечення надійності функціонування каналоутворюючого обладнання та високої стабільності характеристик інформаційних систем в експлуатаційних умовах.

### Постановка проблеми в загальному

Необхідність організації надійного обміну даними в робототехніці та розподілених системах оброблення інформації зумовлює практичне завдання по створенню простих, надійних та недорогих каналоутворюючих пристроїв. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови успішного розв'язання наукових проблем створення та розвитку нових ефективних методів передавання та приймання інформації, зокрема, методів формування та опрацювання широкосмугових сигналів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

На даний час розроблено багато способів передавання та приймання інформації з використанням широкосмугових сигналів. Більшість з яких базується на використанні додаткового сигналу, що розширює спектр, при передаванні та на подальшому кореляційному опрацюванні на стороні приймання [1]. Проте реалізація згаданих систем є складною технічною задачею, а приймально-передавальні пристрої, як правило, потребують значного апаратного та програмного ресурсу. Доцільно зазначити, що сигнали, які використовуються для розширення спектру в таких випадках, наприклад, псевдовипадкові послідовності, мають характеристики, які лише наближаються до випадкових, що не дозволяє використати усі можливості випадкових сигналів і приводить до необхідності зберігання відповідних взірців форми сигналів на стороні приймання. Крім того, необхідність зменшення ймовірності помилок у процесі обміну даними зумовлює зростання бази широкосмугових сигналів, і як наслідок, приводить до зростання апаратних затрат, що не завжди є виправданим [1].

Існують також інші варіанти реалізації згаданих систем. Зокрема, такі у яких взірець псевдовипадкового сигналу, що розширює спектр не зберігається постійно на стороні приймання, а передається в приймач окремим паралельним каналом до початку основного сеансу обміну [1]. Значний розвиток мають способи обміну даними в

основі розширення спектру яких лежить використання негармонійних форм сигналів-носіїв [2]. Також відомі способи де широкопasmові сигнали-носії формуються та обробляються за допомогою явищ динамічного детермінованого хаосу [3]. Знайшли поширення методи формування сигналів з частотним розділенням в бездротових системах [4].

Автору належить започаткування розв'язання проблеми шляхом використання широкопasmових сигналів зі змінною ентропією. Запропонований метод формування та опрацювання широкопasmових сигналів базується на використанні у якості носія шумоподібного випадкового сигналу, ентропія розподілу ймовірностей амплітудних значень якого поставлена у відповідність до символів інформаційного повідомлення, що передається. На даний час проведено дослідження впливу відновлення проміжних значень прийнятого сигналу на завадостійкість [5]. Оцінена рівномірність розподілу енергії таких сигналів за частотами [6]. Проаналізовано ефективність застосування різних ймовірнісних характеристик [7].

#### Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми

Раніше невіршеною частиною загальної проблеми є отримання характеру ймовірнісного розподілу функцій правдоподібності на виході демодулятора та підтвердження факту їх симетрії, саме цьому і присвячена дана робота.

#### Формулювання цілей даної роботи

Одним з невіршених раніше питань щодо способу передавання та приймання інформації за допомогою сигналів зі змінною ентропією є дослідження характеру ймовірнісного розподілу функцій правдоподібності на виході демодулятора та встановлення їх симетрії. Отже, об'єктом дослідження є широкопasmові сигнали з керованою ентропією, предметом дослідження є функції правдоподібності на виході демодулятора, а встановлення характеру їх ймовірнісного розподілу та перевірка симетрії основною метою цієї роботи.

#### Метод обміну даними сигналами зі змінною ентропією

Суть методу полягає у формуванні випадкового широкопasmового сигналу-носія, таким чином, що його ентропія розподілу ймовірностей амплітудних значень або станів, якщо сигнал дискретний, поставлена у відповідність до символів інформаційного повідомлення. Для випадку двійкового базису сигналу повідомлення, це відбувається в спосіб, коли один з дискретних символів, наприклад, "1", представлено випадковим сигналом  $s_1(t)$  з певним значенням ентропії, а другий, відповідно, "0", випадковим сигналом  $s_2(t)$  з іншим значенням ентропії. Значення ентропії довільного сигналу  $x(t)$  визначається наступним чином [1]:

$$H_{x(t)} = - \sum_{j=1}^m p(X_j) \cdot \log_2(p(X_j)), \quad (1)$$

де  $j$  – порядковий номер стану (значення амплітуди) сигналу,  
 $m$  – загальна кількість дискретних станів сигналу,  
 $X_j$  – значення стану з порядковим номером  $j$ ,  
 $p(X_j)$  – ймовірність стану  $X_j$ .

При цьому вважається, що  $0 \cdot \log_2(0) = 0$ .

Сигнал у каналі є неперервним, але формується та обробляється у цифровому представленні з використанням відповідних перетворень. Під станами сигналу, у даному випадку, слід розуміти його квантовані амплітудні значення. У межах проведеного дослідження використовувались 16-ти бітові АЦП та ЦАП, отже сигнал розглядається як такий, що має  $m = 65536$  станів. Ентропія таких сигналів може приймати значення від 0 до 16 біт/відлік. Проведені раніше дослідження показують ефективність застосування сигналів-носіїв для цього методу у вигляді випадкового сигналу з розподілом ймовірностей станів близьким до нормального та рівномірною спектральною щільністю енергії у межах робочої смуги частот.

При прийманні відбувається опрацювання прийнятого сигналу  $r(t)$ . Сигнал  $r(t)$  є сумою згортки переданого сигналу ( $s_1(t)$  або  $s_2(t)$ ) з імпульсною характеристикою каналу  $h_c(t)$  та завади  $n_{кан}(t)$ , джерелом якої є канал зв'язку. Обробка полягає у статистичному оцінюванні ентропії його послідовних фрагментів  $k r(t)$ , що відповідають  $k$ -му символному інтервалу повідомлення, які можна розглядати як  $k$ -у реалізацію випадкового процесу, яким є прийнята суміш сигналу та завади. Оцінювання відбувається згідно (2), оскільки амплітуди сигналу нормально розподілені, за кінцевим проміжком часу (часу символного інтервалу) на підставі однієї реалізації, що є обґрунтованим для випадку стаціонарних та ергодичних процесів.

$$\hat{H}_{r(t)} = \log_2 \sqrt{2\pi e s^2_{r(t)}}, \quad (2)$$

де  $s^2_{r(t)}$  – статистична оцінка стандартного відхилення прийнятого сигналу  $r(t)$ ,  
 $e \approx 2,718$  – основа натурального логарифма.

Згідно з [1], демодуляцією вважається виділення низькочастотного представлення повідомлення з сигналу-носія, а детектуванням – процес ухвалення рішення відносно значення прийнятого інформаційного символу. При прийманні сигналу, у моменти часу  $t = T$ , тобто у моменти завершення символного інтервалу, на виході демодулятора, у переддетекторній точці, формується сигнал  $z(T)$ , значення якого є випадковою величиною і містять в собі випадкову флуктуацію  $n_0(T)$  ( $n_{01}(T)$  та  $n_{02}(T)$  при опрацюванні "1" і "0" відповідно)

з дисперсією  $\sigma_0^2$  ( $\sigma_{01}^2$  та  $\sigma_{02}^2$  при опрацюванні "1" і "0" відповідно), яка обумовлена відхиленнями від стаціонарності завад у каналі, похибкою статистичного оцінювання ентропії, обмеженою в часі тривалістю сигналів, випадковим характером самих сигналів і відповідно вибірок з нього і, фактично, є завадою, що діє на виході демодулятора. Для даного методу, значення сигналу  $z(T)$  визначається як статистична оцінка ентропії  $\hat{H}_T(t)$  суміші корисного сигналу та завади на вході демодулятора за кінцевим проміжком часу. У випадку, коли передається сигнал  $s_1(t)$  математичне сподівання  $z(T)$  дорівнює  $a_1$ , а дисперсія  $\sigma_{01}^2$ , в іншому випадку, коли передається сигнал  $s_2(t)$ , математичне сподівання  $z(T)$  дорівнює  $a_2$ , а дисперсія  $\sigma_{02}^2$  відповідно. Таким чином,  $a_1$  та  $a_2$  це бажані сигнальні компоненти на виході демодулятора, а дисперсії  $\sigma_{01}^2$  та  $\sigma_{02}^2$  характеризують потужність шумової компоненти-завади  $n_{01}(T)$  або  $n_{02}(T)$  на виході демодулятора [1].

Процес детектування інформаційних символів полягає у визначенні приналежності прийнятого сигналу до однієї з двох (для випадку двійкового базису повідомлень) областей. Це відбувається шляхом порівняння сигналу  $z(T)$  у момент завершення символного інтервалу з порогом  $\gamma_0$ , який розраховується виходячи з критерію мінімізації ймовірності прийняття хибного рішення щодо значення прийнятого символу.

#### Викладення основного матеріалу досліджень

Для даного дослідження вибір сигналів  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  та завади  $n_{кан}(t)$  здійснено у один з найбільш наочних варіантів, коли перший стан інформаційного символу, "1" – це випадковий сигнал  $s_1(t)$  з розподілом ймовірностей близьким до нормального, рівномірною спектральною щільністю і відповідним сталим рівнем ентропії, а другий стан символу, "0" – сигнал  $s_2(t)$  – пасивна пауза, при якій відсутня активність передавача і потужність не випромінюється, з нульовим рівнем ентропії. Завада  $n_{кан}(t)$ , що діє у каналі, розглядається як стаціонарний адитивний білий гаусів шум – AWGN.

Для побудови функцій правдоподібності необхідно визначити розподіли ймовірностей сигналу  $z(T)$ . Визначення характеру розподілу ймовірностей завади в точці прийняття рішень проведено шляхом багаторазового обчислення значення сигналу  $z(T)$ , тобто, оцінювання ентропії згідно з (2) змодельованого тестового сигналу з подальшим визначенням відносних частот попадання значень сигналу  $z(T)$  (оцінки ентропії вхідного сигналу) в межі класових інтервалів. Розглянуто два випадки із різною мірою деталізації оцінки, у одному, значення розбиті на 11 класових інтервалів, у другому на 101. Оцінювання ентропії відбувалось на підставі 4000 відліків сигналу 1000 разів. Розподіли відносних частот сигналу  $z(T)$  в точці прийняття рішень для цих випадків, у вигляді гістограм, представлено на рис. 1 та 2. По горизонтальній вісі відкладено значення які приймав сигнал  $z(T)$  під час досліджень, а на вертикальній - відносна частота появи цього значення.

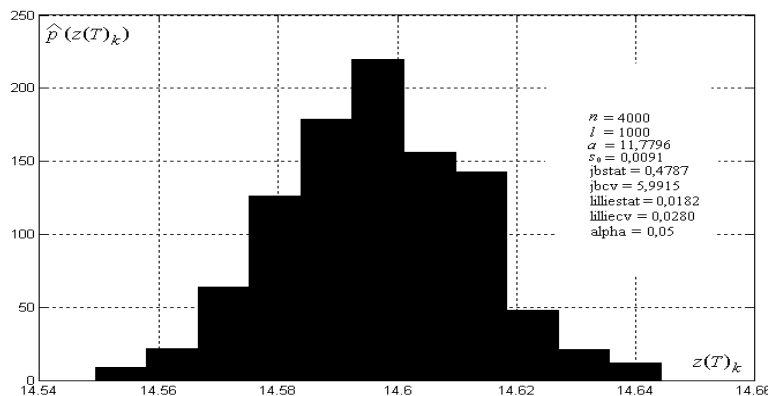


Рис. 1. Розподіл відносних частот оцінки ентропії. Кількість відліків 4000, кількість вибірки оцінок 1000, кількість класових інтервалів 11

Дослідження отриманих результатів за критеріями Жарка-Бера та Лілліфорса, показало, що статистична гіпотеза про нормальність цього розподілу може бути прийнятою при рівні значущості 0,05 (значення тестової статистики 0,4787 при граничному значенні 5,9915 у першому випадку і 0,0182 та 0,0280 в другому).

Отже, доцільно вважати, що функції правдоподібності сигналів мають дзвоновидний гаусів вигляд, що не суперечить відомим теоретичним положенням.

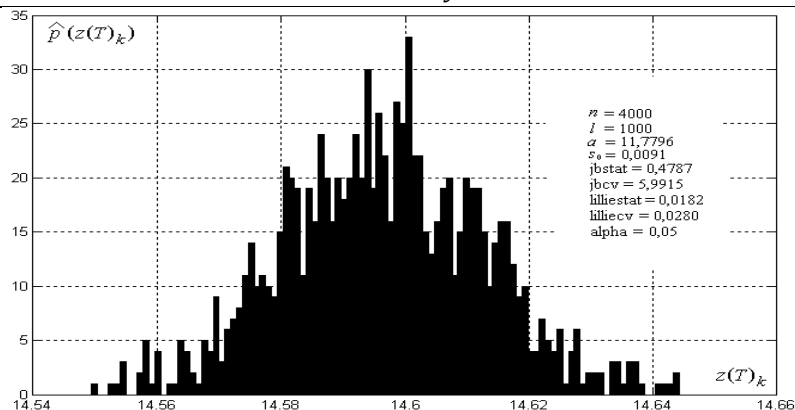


Рис. 2. Розподіл відносних частот оцінки ентропії, кількість відліків 4000, розмір вибірки оцінок 1000, кількість класових інтервалів 101

Для визначення факту симетрії чи асиметрії функцій правдоподібності, який враховується при розрахунку ймовірності помилок, необхідно оцінити залежність параметрів розподілів ймовірностей, зокрема, дисперсії значень сигналу  $z(T)$ , від математичних сподівань значень сигналу  $z(T)$ . Відсутність такої залежності показує, що при зсуві функції правдоподібності вздовж горизонтальної осі не змінюється характер розподілу та дисперсія, отже функції правдоподібності для обох сигналів можна вважати симетричними відносно умовної вертикальної лінії, що проходить через точку їх перетину. Для цього проведено дослідження залежності середньоквадратичного відхилення  $\sigma_0$  сигналу  $z(T)$  від математичного сподівання  $\hat{a}$  цього сигналу (СКВ  $\sigma_0$  для розробленого методу залежить від процедури та параметрів оцінювання ентропії, в т. ч. від кількості відліків, що використовуються для розрахунку оцінки  $\hat{H}$  ентропії). Для дослідження такої залежності проведено багаторазове обчислення значень сигналу  $z(T)$  для трьох змодельованих тестових сигналів з різними значеннями ентропії (100 разів для кожного сигналу, на підставі 100, 1000, 10000 і 100000 відліків сигналу) з подальшим статистичним аналізом. На підставі отриманих масивів даних обчислені оцінка  $\hat{a}$  мат. сподівання  $a$  та оцінка  $s_0$  СКВ  $\sigma_0$  сигналу  $z(T)$  (див. табл. 1).

Таблиця 1

Залежність оцінки  $s_0$  від оцінки  $\hat{a}$

N, дБВт	-20,7		-17,7		-14,7	
	$\hat{a}$	$s_0$	$\hat{a}$	$s_0$	$\hat{a}$	$s_0$
100	13,586	0,105	14,075	0,102	14,584	0,103
1000	13,596	0,030	14,100	0,035	14,599	0,033
10000	13,597	0,011	14,099	0,010	14,596	0,012
100000	13,598	0,003	14,097	0,003	14,598	0,003

Як можна побачити з табл. 1, СКВ  $\sigma_0$  практично не залежить від математичного сподівання  $a$ . Зокрема, для двох сигналів, потужність яких відрізняється на 6 дБ, а ентропія на 1 біт/відлік, різниця оцінок  $s_0$  не перевищує 1,9 % при використанні 100 відліків, тому для практичного застосування функції правдоподібності можна вважати симетричними.

### Висновки

Таким чином, встановлено, що при демодуляції широкосмугових сигналів з керованою ентропією функції правдоподібності мають нормальний розподіл і є симетричними. Отже, для мінімізації ймовірності помилок, поріг детектування, слід визначати як середнє арифметичне між значеннями бажаних сигнальних компонент на виході демодулятора.

### Перспективи подальших досліджень

Основними напрямками подальшого дослідження є вдосконалення процедури оцінювання ентропії, з метою мінімізації помилки, пошук типів сигналів, які забезпечують вищу ефективність демодуляції, розробка ефективних способів демодуляції, реалізація способів ефективної бітової синхронізації тощо.

### Література

1. Sklar Bernard. Digital communications: fundamentals and applications / Bernard Sklar – 2-ed. – Prentice-Hall PTR, 2001. – 1079 p.
2. Terrence W. Barrett. History of Ultra-WideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators.

Progress in Electromagnetics Symposium (PIERS 2000). – Cambridge, Massachusetts, 2000, July.

3. Andreyev Yu. Information Processing in 1-D Systems with Chaos / Andreyev Yu. V., Dmitriev A.S., and Starkov S.O. // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1997, vol. 44, No. 1, pp. 21-28.

4. Heiskala J. OFDM Wireless LANS: A Theoretical and Practical Guide / J. Heiskala, J. Terry. – Indianapolis: Sams Publishing, 2002.

5. Козленко М. І. Вплив відновлення проміжних значень сигналів зі змінною ентропією на завадостійкість обміну даними в автоматизованих системах керування / М. І. Козленко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2011. – № 13(167). – Луганськ: СНУ ім. Володимира Даля, 2011. – С. 308 – 314.

6. Козленко М. І. Ефективність використання частотної смуги при формуванні широкосмугових сигналів в розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних системах / М. І. Козленко // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. - № 1 (011). – Херсон: ХНТУ, – С. 115-120.

7. Козленко М. І. Ефективність застосування ймовірнісних характеристик при формуванні широкосмугових випадкових сигналів в телекомунікаційних та комп'ютерних системах / Козленко М. І. // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – 2012. – № 4 (191). – Хмельницький: ХНУ, 2012. – С. 118 – 125.

#### References

1. Sklar Bernard. Digital communications: fundamentals and applications / Bernard Sklar – 2-ed. – Prentice-Hall PTR, 2001. – 1079 p.
2. Terrence W. Barrett. History of Ultra-WideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators. Progress in Electromagnetics Symposium (PIERS 2000). – Cambridge, Massachusetts, 2000, July.
3. Andreyev Yu. Information Processing in 1-D Systems with Chaos / Andreyev Yu. V., Dmitriev A.S., and Starkov S.O. // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1997, vol. 44, No. 1, pp. 21-28.
4. Heiskala J. OFDM Wireless LANS: A Theoretical and Practical Guide / J. Heiskala, J. Terry. – Indianapolis: Sams Publishing, 2002.
5. Kozlenko M. I., (2011) "Noise proof feature index of the variable entropy spread spectrum signals data exchange with intermediate signal sample values regeneration in automation control systems", *Visnik of the Volodymyr Dahl east Ukrainian national university*, no. 13 (167), pp. 308-314.
6. Kozlenko M. I., (2012) "Frequency resource using of the spread spectrum signals forming in the distributed computer and telecommunication systems", *The problems of information technologies*, no 1 (011), pp. 115-120.
7. Kozlenko M. I. The efficiency of probability characteristics using in forming of the spread spectrum signals in telecommunication and computer systems. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. Technical science. Khmelnytsky. 2012. Issue 4. pp. 118-125.

Рецензія/Peer review : 11.10.2013 р. Надрукована/Printed :24.11.2013 р.

Рецензент: Лазарович І. М., к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника"

УДК 621.317

В.Р. ЛЮБЧИК

Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОХОДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ РАДІОСИГНАЛІВ ЗА НАЯВНОСТІ БАГАТЬОХ ОБ'ЄКТІВ

*Стаття присвячена дослідженню проходження гармонійних сигналів середовищу за наявності багатьох об'єктів відбиття. Отримані аналітичні співвідношення що встановлюють взаємозв'язок між сигналами відбитими від об'єктів та сумарним сигналом.*

*Ключові слова: гармонійний сигнал, векторна діаграма, амплітудно-частота характеристика, фазочастота характеристика.*

V.R. LIUBCHYK

Khmelnytsky National University, Ukraine

## DEVELOPMENT AND STUDY OF MATHEMATICAL MODEL PASSAGE HARMONIOUS RADIOSIGNALS IN THE PRESENCE OF MANY OBJECTS

*Abstract - The article investigates the passage of harmonic signal environment in the presence of many objects of reflection. The analytical relationships that establish the relationship between the signals reflected from objects and the total signal.*

*The basis of the theory laid the interdependence of amplitude and phase shift of harmonic probing signals at different frequencies, which are manifested in the growth and decay of the amplitude of the total signal at the receiving point for the acquisition, which allowed us to obtain analytical dependencies that establish the relationship between the signals reflected from each objects and the total reflected signal in exponential and trigonometric forms.*

*Keywords: harmonic signal vector diagrams, the amplitude-frequency characteristic, phase-frequency characteristics.*

### Вступ

Огляд методів вимірювання дальності об'єктів показав що фазові методи мають найменшу похибку вимірювання, але при цьому вони не дозволяють розрізнити декілька об'єктів. [1] Для розробки методів фазового вимірювання дальності необхідно встановити взаємозв'язки між сумарним сигналом та сигналами відбитими від багатьох об'єктів.

Розглянуті в попередніх роботах математичні моделі [2-3], зв'язують значення вектору сумарного