

УДК :621.396.62 :621.396.96

**АНАЛІЗ АВТОКОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ТА ФУНКЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ СКЛАДНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ З БІНАРНОЮ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ ПОСЛІДОВНІСТЮ КАСАМІ<sup>1</sup>**

*Мрачковський О. Д. , к.т.н., доцент; Шмаков О. М. , магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут», м.Київ, Україна, irinshmakova@yandex.ua*

**ANALYSIS OF AUTOCORRELATION AND AMBIGUITY FUNCTIONS OF  
COMPLICATED RADIOLOCATION SIGNAL WITH BINARY PHASE  
MANIPULATION BY KASAMI SEQUENCE**

*Mrachkovskiy O.D. Cand. Of Sci (Technics), Associate professor, Shmakov O.M.,  
undergraduate student  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»  
irinshmakova@yandex.ua*

**Вступ**

Загальновідомі основні переваги використання складних зондувальних сигналів в сучасних РЛС у випадку використання оптимальної обробки. До них слід віднести [1, 2]:

- Збільшення дальності дії РЛС при збереженні роздільної здатності за дальністю.
- Збільшення потенційної та реальної роздільної здатності за дальністю та швидкістю.
- Збільшення точності оцінки дальності та швидкості.
- Збільшення ефективності роботи РЛС при наявності інтенсивних місцевих завад.
- Збільшення ефективності роботи РЛС в умовах багатопроменевого розповсюдження.
- Можливість розділення слабких сигналів на фоні потужних.
- Збільшення енергетичної, часової та інформаційної скритності РЛС.

Клас складних зондувальних сигналів, які використовуються в сучасних РЛС, є дуже широким і включає ЧМ сигнали з лінійною та нелінійною внутрішньоімпульсною модуляцією та фазокодоманіпульовані сигнали. Особливе місце серед останніх належить складним сигналам з бінарною фазовою маніпуляцією різними послідовностями (кодами). Це пояснюється відносною простотою їх формування та обробки сучасними цифровими методами.

---

<sup>1</sup> Електронний варіант статті: <http://radar.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1046>

Клас бінарних кодів, котрі можуть бути використані в сучасній РЛС, достатньо широкий. Це загальновідомі коди Баркера, Грея, Хафмена, Голда, Голя, Касамі [3]. На жаль, нам невідомі використання кодів Касамі в радіолокації. Цікавість до них обумовлена можливістю збільшення скритності РЛС, що вкрай важливо для забезпечення роботи останньої, шляхом збільшення ансамблю порівняно з М-последностями, розмір ансамблю яких може бути недостатнім для задач скритності [4]. Нам невідомі роботи присвячені аналізу потенційних характеристик радіолокаційного зондувального сигналу з бінарною фазовою маніпуляцією последовністю Касамі, тобто її автокореляційної функції, рівня бічних пелюсток, функції невизначеності, потенційної роздільної здатності за дальністю та швидкістю, без знання котрих неможливо прийняти обґрунтоване рішення про доцільність використання такого сигналу в сучасних РЛС. Визначення цих характеристик є ціллю даної статті.

### **Моделювання зондувального радіолокаційного сигналу з бінарною фазовою маніпуляцією последовністю Касамі**

Коди Касамі з малого ансамблю реалізуються за допомогою двох генераторів М-последностей з різними зворотними зв'язками. В свою чергу формування М-последностей, на основі яких створюється код Касамі, відбувається системою з регістру зсуву і контурів зворотного зв'язку, які підключені до входу регістру через суматор за модулем два. Довжина М-последності визначається ємністю регістру  $m$  (у бітах) і максимально може складати  $2^m - 1$  [5].

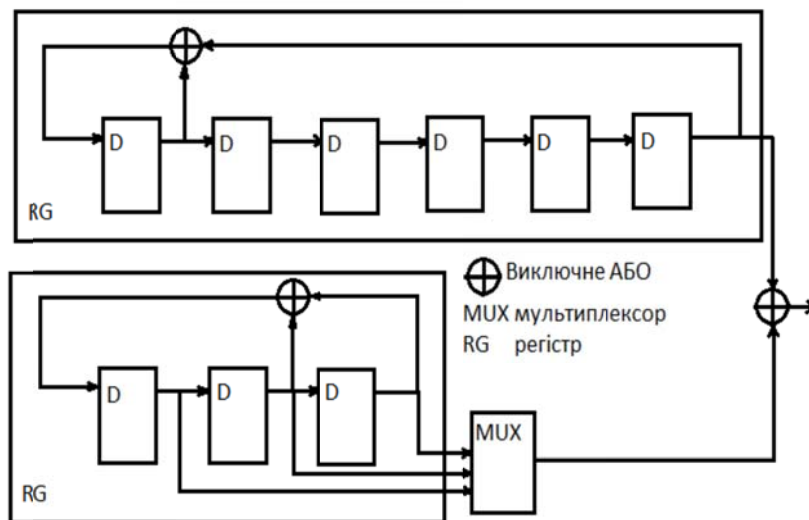


Рис. 1. Приклад генератора последовності

На рис. 1 показаний генератор, що складається з двох зсувних регістрів RG зі зворотними зв'язками (верхній формує 63-х символівну М-

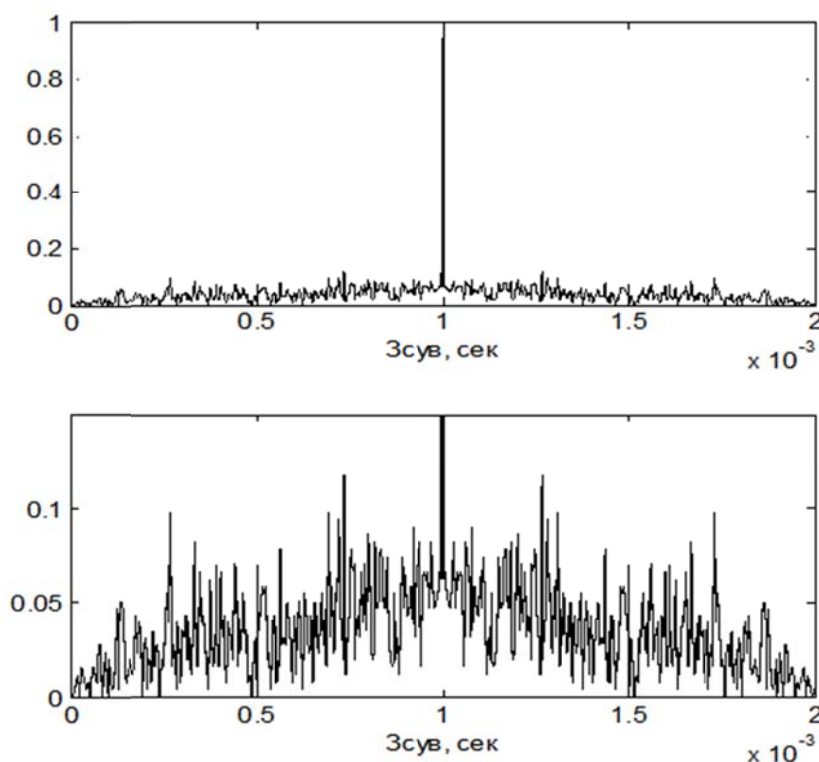
послідовність, нижній генерує 7-ми символну), мультиплексора MUX, за допомогою якого здійснюється вибір зсуву короткої M-послідовності, та елементу «Виключне АБО», на виході якого присутня послідовність Касамі.

### Методика досліджень

З огляду на неможливість виконання точного розрахунку функції невизначеності суто аналітичним шляхом, у середовищі MATLAB була створена математична модель для дослідження. Розрахунки виконувалися для зондувального сигналу з наступними параметрами: центральна частота 5 ГГц, кількість парціальних імпульсів 255, режим роботи РЛС неперервний з частотою повторення зондувальних імпульсів 1 мс. Функція невизначеності та автокорреляційна функція були розраховані при нульовій частоті несучої (на відеочастоті) з ціллю уникнути впливу модуляції на кореляційні характеристики.

Нормована автокорреляційна функція послідовності була розрахована з використанням формули (1), де  $x(n)$  є вхідною послідовністю,  $n$  є номером відліку послідовності і є пропорційним часу,  $t$  позначає зсув послідовності,  $N$  є довжиною послідовності у відліках:

$$R(t) = \frac{\left| \sum_{n=0}^{N-1} \bar{x}(n)\bar{x}(n-t) \right|}{\max\left(\sum_{n=0}^{N-1} \bar{x}(n)\bar{x}(n-t)\right)}; \bar{x}(n) = 2 \frac{x(n)}{\max(x(n))} - 1 \quad (1)$$



На рис. 2 зверху приведений повний вигляд нормованої АКФ послідовності Касамі; знизу показані бічні викиди АКФ у збільшеному масштабі. З даного рисунку видно, що максимуми бічних викидів автокорреляційної функції не перевищують 0.12 та зменшуються зі збільшенням часового зсуву.

Рис. 2. Нормована автокорреляційна функція послідовності

### Моделювання функції невизначеності

Функція невизначеності розраховувалася стандартною програмною функцією `ambgfun`.

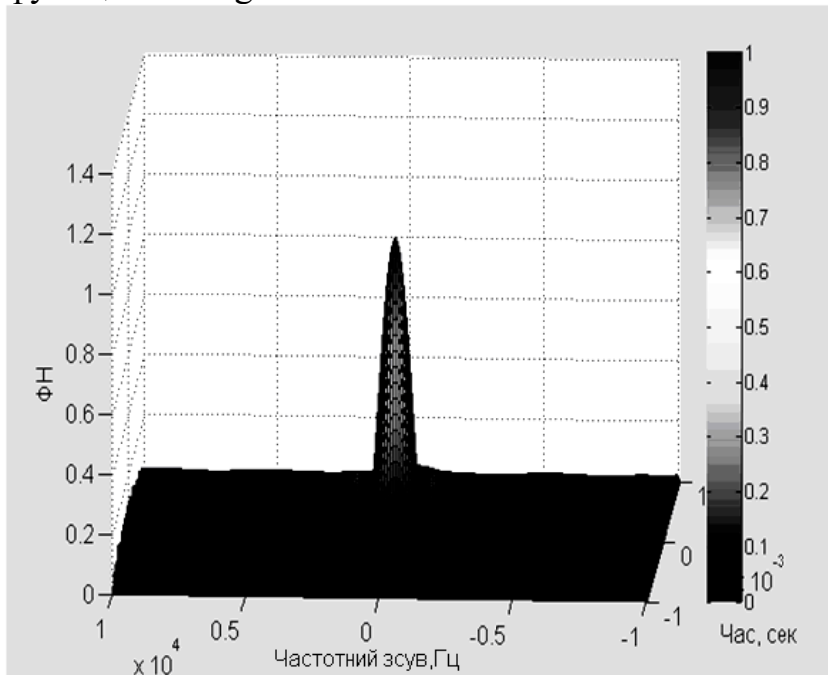


Рис. 3. Функція невизначеності сигналу, загальний вид (рядок більша за амплітуду другого).

Для визначення ширини головної пелюстки функції невизначеності на рис. 4 побудовані перерізи її по рівнях 0.5, 0.7 та 0.9.

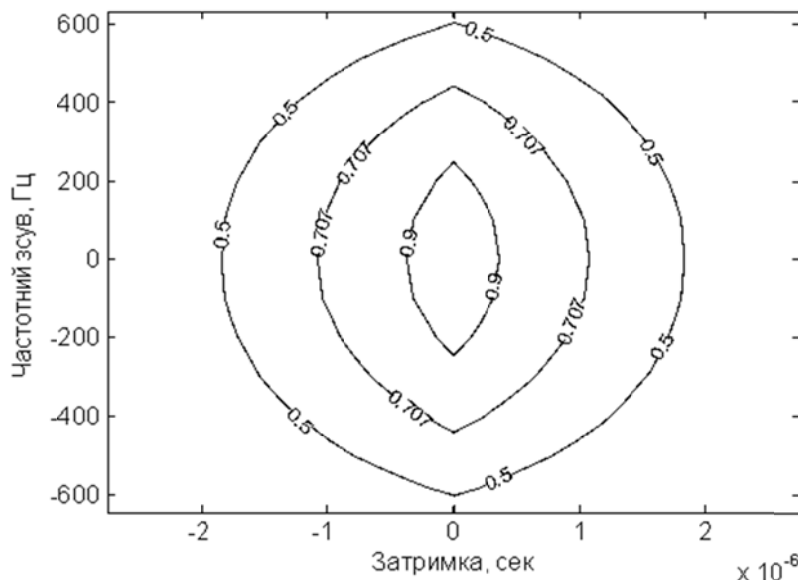


Рис. 4. Функція невизначеності сигналу, перерізи головної пелюстки

імпульсу  $\tau_i = 1$  мс та ширини спектра сигналу по межі головної пелюстки  $W=510$ кГц.

Як видно з рис. 3, амплітуда першої бокової пелюстки при зміні частоти значно більша за амплітуду першої бокової пелюстки при зміні затримки, що може призвести до зменшення роздільної здатності за швидкістю при певному відношенню амплітуд сигналів, що розділяються (а саме, амплітуда одного сигналу на по-

рядок більша за амплітуду другого). Як видно з рис. 4, ріст ширини головної пелюстки по частоті повільніший за її ріст по затримці.

Розраховані значення роздільних здатностей за дальністю та за швидкістю для рівнів функції невизначеності 0.5, 0.7 та 0.9 приведені в табл. 1. Отримані значення були пронормовані відносно тривалості

Таблиця 1

Рівень ФН	Роздільна здатність за дальністю	Роздільна здатність за швидкістю
0.5	$0.95/W$	$1.2/\tau_i$
0.7	$0.55/W$	$0.88/\tau_i$
0.9	$0.2/W$	$0.48/\tau_i$

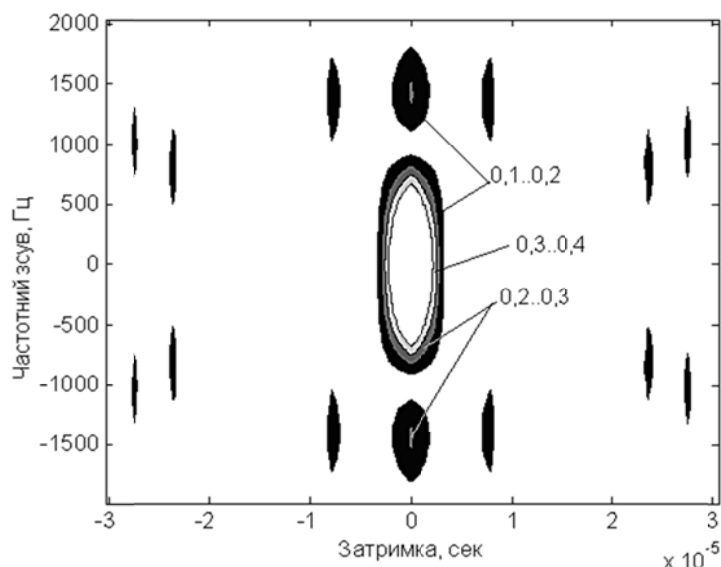


Рис. 5. Функція невизначеності сигналу, перерізи центральної області

Для розгляду впливу бокових пелюсток в області біля головної, побудовані перерізи функції невизначеності по рівнях 0.1, 0.2, 0.3 та 0.4

Як видно з рис. 5, майже всі наявні бокові пелюстки мають амплітуду менше 0.2, виключенням є перші бокові пелюстки по частоті (див. опис рис. 3). Необхідним є також зазначити наявність області функції невизначеності з амплітудою ви-

кидів менше 0.1, яка досягається при зсувах більших за ширину головної пелюстки, але менших за 22 мкс (що становить приблизно 3 ширини головної пелюстки по часовій затримці). Наявність такої області означає, що при використанні кодів Касамі роздільна здатність по дальності буде краща за роздільну здатність по швидкості при однакових точностях оцінки цих величин.

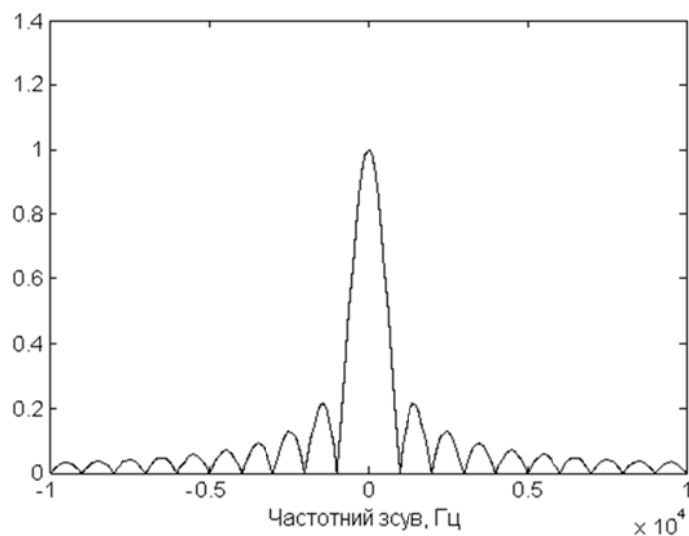


Рис. 6. Переріз ФН по осі частот

Для оцінки частотних параметрів функції невизначеності на рис. 6 показаний центральний еквідальностний (по частоті при нульовій затримці) переріз.

Як видно з рис. 6, даний переріз може бути описаний як модуль нормованого амплітудного спектра парціального імпульсу.

### Висновки

- Автокорреляційна функція досліджуваної послідовності має бокові викиди, які не перевищують 12% від максимуму.
- Перерізи функції невизначеності носять наближений до еліпсоїдного характер зі змінним відношенням розмірів по осях дальності та швидкості.
- Центральний еквідальний переріз функції невизначеності може бути описаний як функція виду  $|\sin(x)/x|$ .
- Зменшення роздільної здатності по швидкості для послідовності Касамі порівняно з М-послідовністю тієї ж довжини становить близько 9%.
- Враховуючи мале зниження характеристик використання послідовностей Касамі може бути визнане можливим в РЛС зі збільшеними вимогами до інформаційної скритності сигналу.

### Перелік посилань

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин; под ред. А. А. Сикарев. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Мазурков М. И. Системы широкополосной радиосвязи: учеб. пособие для студ. вузов / М. И. Мазурков. – О. : Наука и техника, 2009. – 344 с.
3. Kasami, T. Weight distribution formula for some class of cyclic codes / T. Kasami. – Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois, 1966.
4. Olsen J. D. Bent-function sequences / J. D. Olsen, R. A. Scholtz, L. R. Welch // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1982. – Vol. IT-28, pp. 858-864.
5. Астровский И. И. Исследование свойств, способов формирования и обработки последовательностей Голда в системах подвижной связи [Электронный ресурс] / И. И. Астровский, П. М. Буй. – 2006. – Режим доступа: [http://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/771/1/Исследов\\_свойств\\_способов\\_формирования\\_Метод\\_указ\\_.pdf](http://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/771/1/Исследов_свойств_способов_формирования_Метод_указ_.pdf)

### References

1. Varakin L. E. and Sikarev A. A. eds. (1985) *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz', 384 p.
2. Mazurkov M. I. (2009) *Sistemy shirokopolosnoi radiosvyazi* [Broadband radio system]. Nauka i tekhnika Publ., 344 p.
3. Kasami, T. (1966) *Weight distribution formula for some class of cyclic codes*, Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois.
4. Olsen J. D., Scholtz R. A. and Welch L. R. (1982) Bent-function sequences. *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. IT-28, pp. 858-864.
5. Astrovskii I.I. and Bui P.M. (2006) *Issledovanie svoistv, sposobov formirovaniya i obrabotki posledovatel'nostei Golda v sistemakh podvizhnoi svyazi* [Study of the properties, methods of forming and processing of Gold sequences in mobile communication systems].

*Мрачковский О. Д., Шмаков О. М. Аналіз автокорреляційної функції та функції невизначеності складного радіолокаційного сигналу з бінарною фазовою маніпуляцією послідовністю Касамі. Розглянуто метод формування послідовностей Касамі, їхні властивості. Наведені графіки результатів виконання програми для коду Касамі: автокорреляційні функції, перерізи по частотному зсуву, об'ємні графіки функції невизначеності та їхні перерізи на різних рівнях. Проаналізовані викиди боковиків АКФ, розрізнявальні здатності за дальністю та швидкістю.*

**Ключові слова:** послідовність Касамі, автокорреляційна функція, функція невизначеності.

*Мрачковский О. Д., Шмаков А. Н. Анализ автокорреляционной функции и функции неопределенности сложного радиолокационного сигнала с бинарной фазовой манипуляцией последовательностью Касами. Рассмотрен метод формирования последовательностей Касами, их свойства. Приведены графики результатов выполнения программы для кода Касами: автокорреляционные функции, сечения по частотному сдвигу, объемные графики функции неопределенности, а также их сечения на разных уровнях. Проанализированные выбросы боковиков АКФ, разрешающие способности по дальности и скорости.*

**Ключевые слова:** последовательность Касами, автокорреляционная функция, функция неопределенности.

*Mrachkovskiy O. D., Shmakov O. M. Analysis of autocorrelation and ambiguity function of complicated radiolocation signal with binary phase manipulation by Kasami sequence.*

*Introduction.* Publications dedicated to pseudorandom sequences in radiolocation were reviewed. Conclusion about necessity of researching in this subject was made.

*Modeling of probing radiolocation signal with binary phase manipulation by Kasami sequence.* The method of forming Kasami sequences and measuring their properties were considered. Example of generator for sequence with length 63 symbols is also shown.

*Technique of research.* Graphical results for modeling of Kasami sequence with lengths of 255 binary values were shown. Amplitudes of side maximums of autocorrelation function are measured.

*Modeling of ambiguity function.* In this article, graphical results for modeling Kasami sequence ambiguity function are shown. These includes 3-dimensional plot of function body and its cross-sections by plane of equal ranges and planes of function level, equal to 0.9, 0.7, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 and 0.1 of its maximum. Amplitude of side maximums, cross-section form and relative values of range and speed resolution were analyzed.

*Conclusion.* These articles contain analyses of characteristics of previously shown plots included estimation of total value of side maximums of ambiguity function of Kasami sequence, ambiguity function cross-section form analysis and conclusion about ability of using these sequences as probe signal in radiolocation.

**Keywords:** Kasami sequence, autocorrelation function, ambiguity function.