

**АНАЛІЗ СПЕКТРА СКЛАДНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО
СИГНАЛА З БІНАРНОЮ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ
ПОСЛІДОВНІСТЮ КАСАМІ¹**

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

**SPECTRUM ANALYSIS OF COMPLICATED RADIOLOCATION SIGNAL WITH
BINARY PHASE MANIPULATION BY KASAMI SEQUENCE**

*Mrachkovskiy O. D., PhD, Associate Professor; Shmakov O. M., Undergraduate Student
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

Вступ

Відомо, що дальність дії РЛС в імпульсному режимі пропорційна кореню четвертого ступеня від енергії сигналу: $D \equiv \sqrt[4]{E} = \sqrt[4]{P_i \cdot \tau_i}$, де P_i – імпульсна потужність, τ_i – довжина зондувального імпульсу. У рамках традиційної імпульсної радіолокації з використанням тональних сигналів принципово не вирішується її основне протиріччя між дальністю дії РЛС і точністю оцінки дальності до цілі [1]. Суть цього протиріччя полягає в тому, що при незмінній імпульсній потужності РЛС зростання енергії зондувального сигналу можливо тільки за рахунок збільшення довжини зондувального імпульсу. Тому при збільшенні дальності дії РЛС без зміни амплітуди імпульсу необхідно збільшити тривалість зондувального сигналу, що приводить до зниження точності оцінки дальності, і навпаки, підвищення точності оцінки дальності призводить до зниження дальності дії. Це обмеження зникає при використанні складних широкосмугових зондувальних сигналів. Складними зондувальними сигналами називаються сигнали для котрих добуток тривалості зондувального імпульсу τ_i на ширину його спектра W значно більший за одиницю $\tau_i \cdot W \gg 1$.

Історично першим складним зондувальним сигналом був сигнал з лінійною частотною модуляцією. Потім клас складних сигналів розширився за рахунок сигналів з нелінійною внутрішньоімпульсною частотною модуляцією та фазокодоманіпульованих сигналів, у яких маніпуляція фази виконується за допомогою кодових послідовностей. У якості останніх добре відомі послідовності Баркера, Грея, М-послідовності, Голея, Голда, Касамі [2]. Інтерес до використання бінарної фазової маніпуляції пов'язаний з

¹ Електронний варіант статті: <http://radar.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1045>

відносною простотою цифрових методів формування та обробки таких сигналів. Не дивлячись на те, що послідовності Касамі відомі відносно давно [3], питання про їх використання в радіолокації не розглядалось, хоча виходячи з властивостей послідовності Касамі, які належать до класу мінімаксних послідовностей (в яких максимальні бічні викиди мінімальні), подібне застосування є можливим. За рахунок використання кодів Касамі можливо збільшити розмір ансамблю зондувальних сигналів порівняно з М-послідовностями і тим самим ускладнити процедуру розшифрування застосовуваного коду [4].

Дана робота присвячена огляду методу формування послідовностей Касамі, аналізу їх амплітудних та фазових спектрів.

Метод формування послідовностей Касамі

Малий ансамбль послідовностей Касамі довжиною $2l$ формується на основі М-послідовності тієї ж довжини (“довгої” послідовності). Для породжуючого поліному останньої будується поле Галуа $GF(2^{2l})$. Другий породжуючий поліном обирається таким чином, щоб його корені дорівнювали $2^i(2^l+1)$ -тим елементам даного поля, де $i=0..l-1$. Коротка послідовність, породжена цим поліномом, буде мати максимальну довжину. Послідовність Касамі $K_0(j)$, де $j=1..2^{2l}-1$, формується шляхом сумування по модулю 2 (операція XOR) короткої послідовності, циклічно повтореної до довжини $2l$ з оригінальною довгою М-послідовністю. Шляхом зсуву короткої послідовності на один чи більше символ перед операцією XOR можна отримати 2^l-2 послідовностей $K_k(j)$ довжиною $2^{2l}-1$. Малий ансамбль містить 2^l-1 послідовностей $K_k(j)$, де $j=0..2^l-1$, оригінальну довгу М-послідовність та коротку послідовність, циклічно повторену до довжини $2l$, усього 2^l+1 послідовність [5]. Вони вважаються оптимальними в тому розумінні, що для будь-якої пари кодових послідовностей забезпечуються максимальні значення автокореляційної функції та мінімальні значення взаємкореляційної функції.

Формування структурної схеми генератора послідовностей Касамі

Коди Касамі реалізуються за допомогою двох генераторів М-послідовностей з різними зворотними зв'язками. В свою чергу формування М-послідовностей, на основі яких створюється код Касамі, відбувається системою з регістру зсуву і контурів зворотного зв'язку, які підключені до входу регістру через елемент “XOR”. Довжина М-послідовності визначається ємністю регістру m (у бітах) і максимально може складати 2^m-1 .

На рис. 1. показаний генератор, що складається з двох зсувних регістрів RG1 та RG2 зі зворотними зв'язками, які формують М-послідовності, мультиплексора MUX, за допомогою якого здійснюється вибір зсуву короткої М-послідовності, та елементу “XOR”, на виході якого присутня послідовність Касамі.

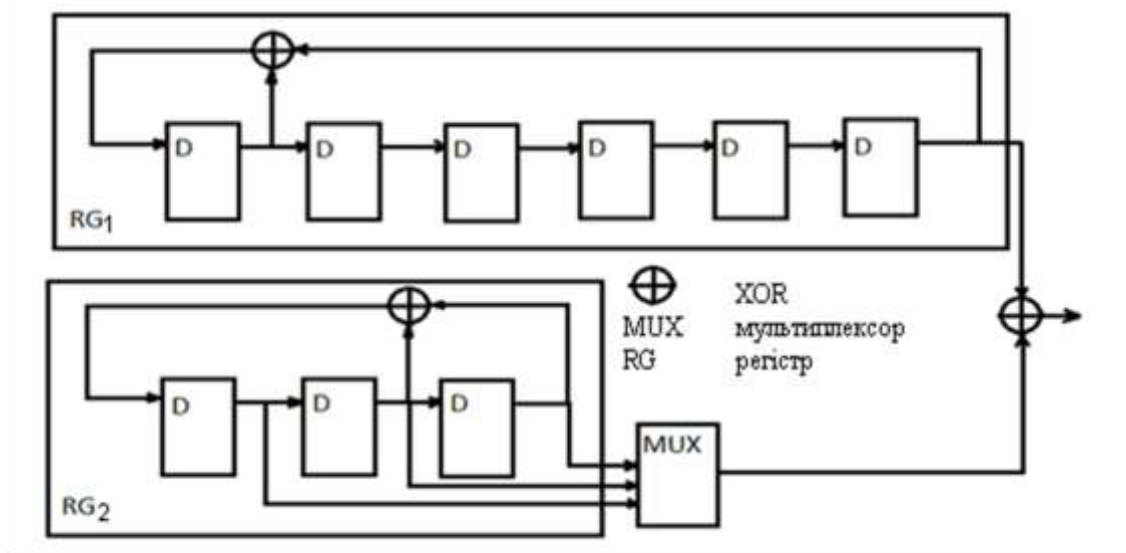


Рис. 1. Приклад генератора послідовності

Спектри послідовностей Касамі

За допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) можна отримати комплексний (1), амплітудний (2) та фазовий (3) спектри послідовності:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \right) \quad (1)$$

$$A(m) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \right) \right| \quad (2)$$

$$\Phi(m) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(X(m))}{\text{Re}(X(m))}\right) = \arctg\left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi nm}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right)}\right) \quad (3)$$

де $X(m)$ – m -ий компонент ДПФ в частотній області, m – індекс ДПФ в частотній області, $x(n)$ – послідовність вхідних відліків, n – часовий індекс вхідних відліків, N – кількість відліків вхідної послідовності (число парціальних імпульсів).

У зв'язку з складністю подальших аналітичних розрахунків, у середовищі MATLAB був проведений розрахунок амплітудного та фазового спектра (з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є) для сигналу з бінарною фазовою маніпуляцією послідовністю Касамі довжиною 1023 парціальних імпульси та тривалістю 10 мкс, центральна частота 1 ГГц.

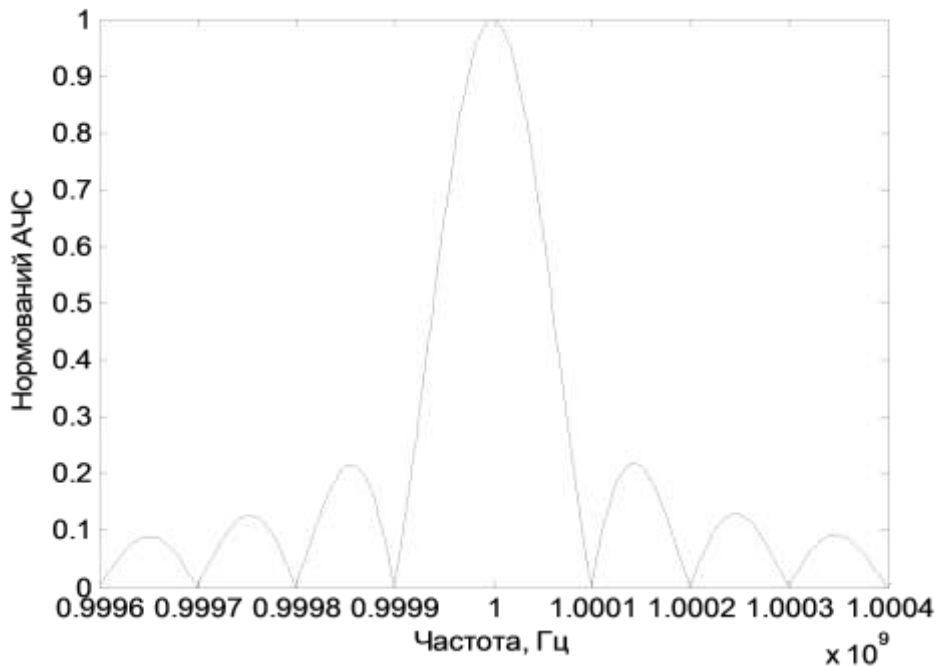


Рис.2. Амплітудний спектр сигналу

Приведений на рис. 2 амплітудний спектр має наступні характеристики: спектр має вигляд модуля функції $|\sin(x)/x|$ з розташуванням нулів у точках з частотами, кратними 0,1 МГц; максимум першої бокової пелюстки 0,2186 від максимуму головної, максимум другої бокової пелюстки 0,1297 від максимуму головної, максимум третьої бокової пелюстки 0,0927 від максимуму головної.

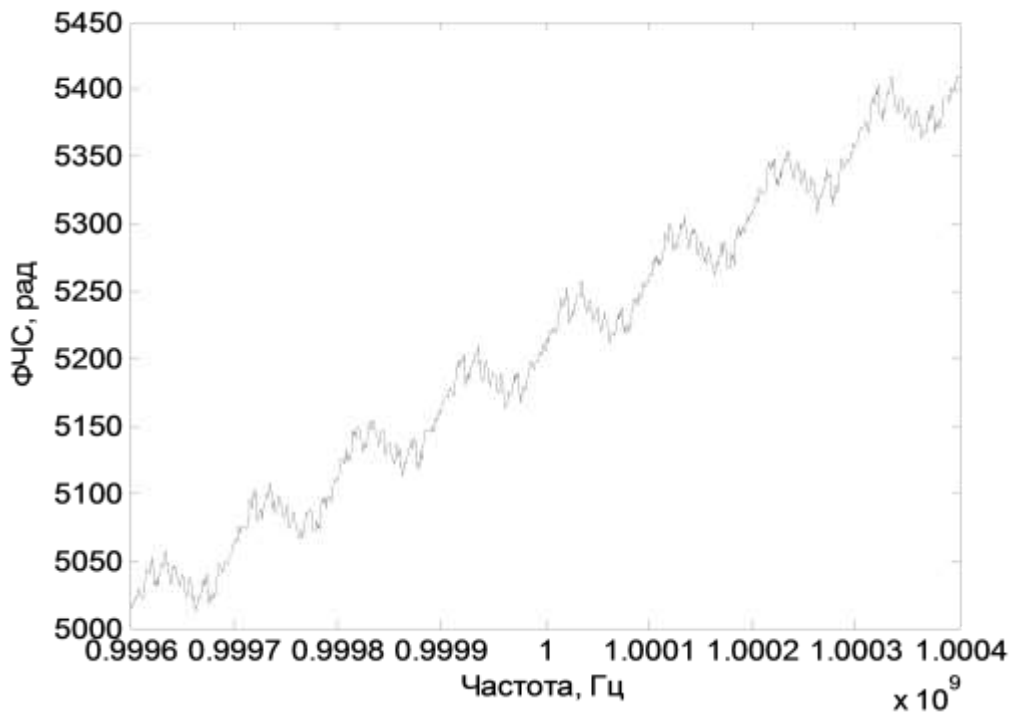


Рис. 3. Фазовий спектр сигналу

Приведений на рис. 3 фазовий спектр є періодичним з періодом 0,1 МГц та знаходиться у першому квадранті декартової системи координат .

Для порівняння був розрахований спектр для сигналу, модульованого послідовністю Касамі довжиною 255 парціальних імпульсів та тривалістю 10 мкс, з центральною частотою 1 ГГц.

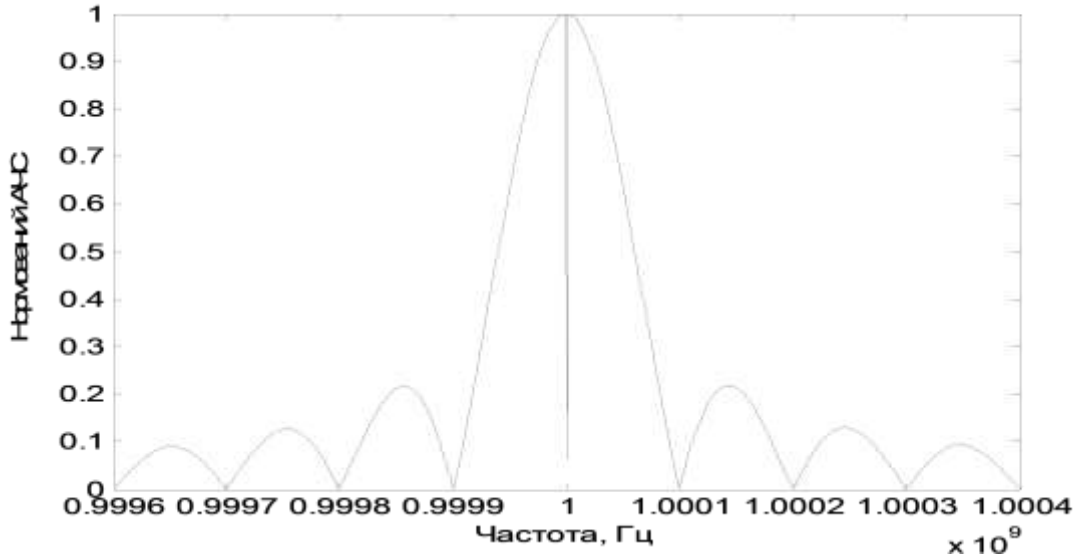


Рис. 4. Амплітудний спектр послідовності Касамі

Приведений на рис. 4 амплітудний спектр має наступні характеристики: спектр має вигляд модуля функції $|\sin(x)/x|$ з розташуванням нулів у точках з частотами, кратними 0,1 МГц; максимум першої бокової пелюстки 0,2186 від максимуму головної, максимум другої бокової пелюстки 0,1297 від максимуму головної, максимум третьої бокової пелюстки 0,0927 від максимуму головної; на несучій частоті наявний провал АЧС.

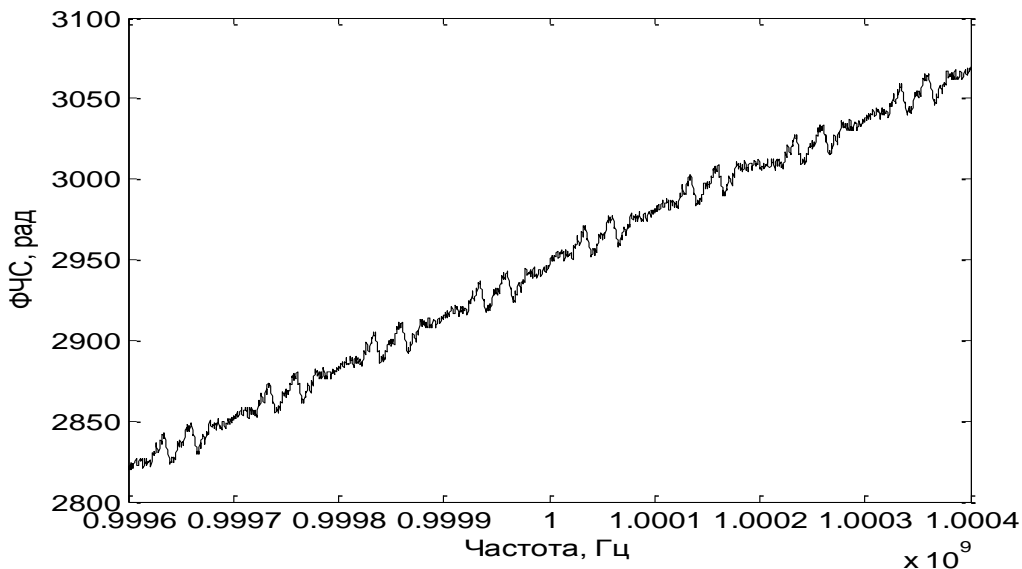


Рис. 5. Фазовий спектр послідовності Касамі

Приведений на рис. 5 фазовий спектр знаходиться у першому квадранті

декартової системи координат та є періодичним з періодом 0,1 МГц.

Висновки

Аналіз приведених спектральних характеристик показує наступне::

- амплітудний спектр має вигляд функції $|\sin(x)/x|$ і визначається спектром парціального імпульсу;
- нулі амплітудного спектра визначаються спектром парціального імпульсу;
- співвідношення між максимумами головної та бічних пелюсток амплітудного спектра не змінюється при зміні кількості парціальних імпульсів;
- фазовий спектр сигналу має періодичну структуру;
- вигляд фазового спектра у межах пелюстки визначається обраною послідовністю.

Перелік посилань

1. Физическая энциклопедия. Гл. ред. А.М. Прохоров. Москва: "Большая Российская энциклопедия", 1995. Т. 4.
2. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети: Пер. с англ. Издательский дом «Вильямс», 2003.— 640 с.
3. Kasami, T. Weight distribution formula for some class of cyclic codes, Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois, 1966.
4. J. D. Olsen, R. A. Scholtz, and L. R. Welch, "Bent-function sequences," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-28, pp. 858-864, 1982.
5. Исследование свойств, способов формирования и обработки последовательностей Голда в системах подвижной связи / Сост. И.И. Астровский, П.М. Буй — 2006. http://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/771/1/Исследов_своиств_способов_формирования_Метод_указ_.pdf

References

1. Prokhorov A.M. *Fizicheskaya entsiklopediya*. [Physical encyclopedia] Moscow: "Bol'shaya Rossiiskaya entsiklopediya" Publ., 1995. vol. 4
2. Stallings W. *Wireless Communications and Networking*. New Jersey, 2002. (Russ. ed.: Stollings V. *Besprovodnye linii svyazi i seti: Per. s angl.* Moscow, Vil'yams Publ., 2003. 640 p.).
3. Kasami, T. Weight distribution formula for some class of cyclic codes, Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois, 1966.
4. J. D. Olsen, R. A. Scholtz, and L. R. Welch, "Bent-function sequences," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-28, pp. 858-864, 1982.
5. Astrovskii I.I., Bui P.M. *Issledovanie svoistv, sposobov formirovaniya i obrabotki posledovatel'nostei Gol'da v sistemakh podvizhnoi svyazi* [Study of the properties, methods of forming and processing of Gold sequences in mobile communication systems]. Available at: http://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/771/1/Issledov_svoistv_sposobov_formirovaniya_Metod_ukaz_.pdf

Мрачковский О. Д., Шмаков О. М. Аналіз спектра складного радіолокаційного сигналу з бінарною фазовою маніпуляцією послідовністю Касамі. У роботі розглянуто принципи формування послідовності Касамі, наведена структурна схема генератора

послідовності на основі реєстрів зсуву і дано опис її роботи. Проаналізовані спектральні характеристики радіолокаційного сигналу з бінарною фазовою маніпуляцією послідовностями Касамі різної довжини. Розраховані амплітудні та фазові спектри такого сигналу.

Ключові слова: послідовність Касамі, амплітудний спектр, фазовий спектр.

Мрачковский О. Д., Шмаков А. Н. Анализ спектра сложного радиолокационного сигнала с бинарной фазовой манипуляцией последовательностью Касами. В работе рассмотрены принципы формирования последовательности Касами, приведена структурная схема генератора последовательности на основе регистров сдвига и дано описание ее работы. Проанализированы спектральные характеристики радиолокационного сигнала с бинарной фазовой манипуляцией последовательностями Касами различной длины. Рассчитаны амплитудные и фазовые спектры такого сигнала.

Ключевые слова: последовательность Касами, амплитудный спектр, фазовый спектр.

Mrachkovskiy O. D., Shmakov O. M. Spectrum analysis of complicated radiolocation signal with binary phase manipulation by Kasami sequence.

Introduction. This article contains short introduction to history of complicated signals and list of common sequences used in spectrum spreading.

Method of creating Kasami sequences. Sequence creation method based on method of creating maximum length sequence is shown in this article.

Creating the structural schema of Kasami sequences generator. Principles of Kasami sequence generator construction are shown in this article. Example of generator for sequence with length 63 symbols, which are created using method, mentioned in previous article, is also shown.

Spectrum of Kasami sequences. This article contains amplitude and phase spectrum of two Kasami sequences with lengths of 1023 and 255 symbols. Theoretical formulas are created using Discrete Fourier Transform operation, and graphics are plotted using Fast Fourier Transform operation. Phase spectrum data is also was changed by unwrap operation for better visibility.

Conclusion. This article contains analysis of previously shown spectrum characteristics. Several conclusions are made about correlation between sequence and spectrum characteristics. These conclusions include that made about amplitude spectrum form dependence of sequence length, type and basic impulse characteristics.

Keywords: Kasami sequence, amplitude spectrum, phase spectrum.