

УДК 621.391

А.И. Кушнир¹, К.С. Васюта², А.В. Крыжний³, Ф.Ф. Зоц²¹Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница²Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков³Военный институт телекоммуникаций и информатизации ДУТ, Киев

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РАДИОИМПУЛЬСА, СФОРМИРОВАННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЛЕМЕРА

В работе анализируются корреляционные свойства радиоимпульса сформированного путем частотной модуляции гармонической несущей псевдослучайной последовательностью Лемера. Проведен сравнительный анализ свойств предложенного сигнала с известными шумоподобными сигналами. Показано, что средний уровень и максимальное значение боковых пиков тела неопределенности радиоимпульса сформированного с помощью ПСП Лемера меньше чем у сигнала, сформированного на основе полинома Чебышева. Применение данного сигнала в радиолокационных системах позволит обеспечить более высокую скрытность их функционирования, так как такой сигнал не имеет структурированного аттрактора в отличие от M -последовательностей и хаотических сигналов. Радиоимпульс сформированный на основе ПСП Лемера позволяет обеспечить высокую разрешающую способность по дальности и скорости при максимальном значении боковых пиков не более $2/\sqrt{N}$.

Ключевые слова: шумоподобные сигналы, корреляционные свойства, скрытность.

Введение

Основными средствами для решения задачи навигации и посадки летательных аппаратов в сложных метеоусловиях и ночью являются радиолокационные системы посадки, например: РСП-6М2 и РСП-10МН1. При выполнении мер защиты военных аэродромов от радиотехнических средств разведки противника необходимо обеспечить скрытность функционирования данных средств. Одним из способов решения данной задачи на сигнальном уровне является применение широкополосных сигналов в качестве зондирующих при модернизации стоящих на вооружении систем посадки. Это может быть достигнуто за счет применения хаотических сигналов в радиолокационных станциях, как предложено в [1]. Однако хаотические сигналы проявляют структурированность в фазовом пространстве и поэтому обнаруживаются при применении не классических методов обнаружения [2], в частности на основе расчета значений BDS-статистики. В работе [3] показано, что сигнал, полученный путем частотной модуляции гармонической несущей с помощью псевдослучайной последовательности (ПСП) Лемера имеет фазовый портрет подобный шуму с равномерным распределением амплитуд. Поэтому очевидно, что такой сигнал обладает более высокой скрытностью, чем простой хаотический сигнал при прочих равных условиях, так как не имеет структурированного аттрактора, который обнаруживается методами нелинейного анализа [2]. В тоже время расширение спектра зондирующего сигнала в измерительных радиолокационных системах позволяет повысить разрешающую способность по

дальности, что актуально при обеспечении безопасности полетов авиации во время построения боевых порядков с помощью РСП с повышенной разрешающей способностью. Как известно, в РСП-6М2 и РСП-10МН1 [4] применяются простой (гладкий) и фазо-манипулированный радиоимпульсы, которые позволяют обеспечить разрешающую способность по дальности 450 м. Поэтому контроль дистанции до 500 м между самолетами осуществляется пилотом визуально.

При выборе зондирующего сигнала в радиолокационных станциях первоочередной задачей является оценка его корреляционных свойств. Следовательно, целью данной работы является оценка и сравнительный анализ корреляционных свойств сигнала сформированного с помощью ПСП Лемера с другими известными шумоподобными сигналами.

Ожидается, что применение широкополосного сигнала полученного с помощью ПСП Лемера в РСП, позволит повысить их разрешающую способность по дальности, обеспечивая при этом скрытность их функционирования, а также ЭМС радиоэлектронных средств за счет кодового разделения.

Изложение основного материала

Зондирующий сигнал, как показано в работе [3] формируется путем частотной модуляции гармонического сигнала ПСП и имеет вид

$$U_n = A \cos(\pi f_0 L_n n + \varphi_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; f_0 – частота колебания; L_n – ПСП, полученная мультипликативным конгруэнтным методом Лемера [5]; $n = 1..N$

(N – количество отсчетов или дискрет); φ_0 – начальная фаза.

Данная ПСП описывается выражением

$$L_{n+1} = aL_n \pmod{m}, \quad (2)$$

где a и m – неотрицательные целые числа. Для генерирования последовательности L_n необходимо задать начальное значения L_0 и умножить его на постоянный коэффициент a , далее извлечь модуль полученного числа по m (т.е. разделить на aL_n и остаток считать как L_{n+1}).

Анализ свойств синтезированного зондирующего сигнала рассмотрим на основе анализа его тела неопределенности. На рис. 1 приведено тело неопределенности сигнала сформированного при помощи (1), полученное путем имитационного моделирования. По оси x отложены значения рассогласования по времени τ , по оси y – значения доплеровского сдвига частоты F , по оси z – значение автокорреляционной функции $\rho(\tau, F)$. Полученное тело неопределенности имеет “игольчатый” или “кнопочный” вид, как у белого шума [6]. Однако, данный вывод имеет лишь качественный характер.

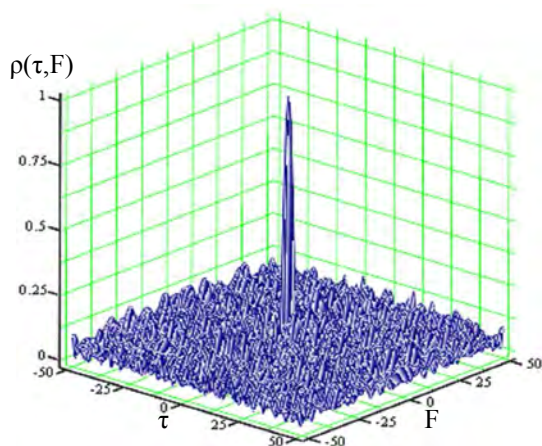


Рис. 1. Тело неопределенности радиоимпульса сформированного с помощью ПСП Лемера

Для более детальной оценки характеристик полученного тела неопределенности воспользуемся

элементами корреляционного анализа предложенными в [7].

В табл. 1 приведено несколько основных расчетных характеристик для АКФ и ВКФ от рассогласования по времени $\rho(\tau)$ ($F = 0$) М-последовательности, радиоимпульса сформированного на основе ПСП Лемера и полинома Чебышева.

Среднеквадратическое значение боковых пиков R_i , определяемое через дисперсию

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{2N} \sum_{i=-(N)}^N R_i^2, \quad (3)$$

среднее значение модулей боковых пиков

$$m_{|R|} = \frac{1}{2N} \sum_{i=-(N)}^N |R_i|, \quad (4)$$

среднеквадратическое значение модулей боковых пиков, определяемое через дисперсию

$$\sigma_{|R|}^2 = \sigma_R^2 - m_{|R|}^2, \quad (5)$$

а также значение максимального бокового пика R_{\max} .

Вычисленные характеристики приведены в ненормированном виде, т. е. умножены на \sqrt{N} . Полученные результаты характеризуют превышение σ_R , $m_{|R|}$, $\sigma_{|R|}$, R_{\max} уровня \sqrt{N} (для $N = 127$). В табл. 1 также для сравнения приведены характеристики КФ белого шума [7].

Из сравнения полученных характеристик анализируемых сигналов следует, что средний уровень боковых пиков АКФ сигналов, полученных на основе ПСП Лемера и полинома Чебышева, ниже чем у белого шума, но выше чем у М-последовательности. Полученные характеристики для сигнала на основе ПСП Лемера лучше, чем для шумоподобного сигнала сформированного на основе применения полинома Чебышева.

В тоже время уровень боковых пиков ВКФ сигнала на основе ПСП наиболее низкий по сравнению с другими сигналами. Это свойство позволит обеспечить ЭМС нескольких средств, при их размещении на одной или соседних позициях аэродрома.

Таблица 1

Характеристики корреляционных функций по времени шумоподобных сигналов и белого шума ($N = 127$)

Корреляционные функции по времени	$\sigma_R \sqrt{N}$	$m_{ R } \sqrt{N}$	$\sigma_{ R } \sqrt{N}$	$R_{\max} \sqrt{N}$
АКФ М – последовательностей	0,4	0,32	0,26	0,7 ... 1,25
ВКФ М – последовательностей	0,73	0,54	0,48	1,4...5
АКФ шумоподобного сигнала на основе ПСП Лемера	0,62	0,47	0,39	1,6
ВКФ шумоподобного сигнала на основе ПСП Лемера	0,68	0,5	0,46	2,1
АКФ шумоподобного сигнала на основе полинома Чебышева	0,66	0,5	0,39	1,8
ВКФ шумоподобного сигнала на основе полинома Чебышева	0,7	0,52	0,47	2,2
КФ (АКФ, ВКФ) белого шума	0,7	0,56	0,43	2,1 ... 3,5

В [7] приведені вище перераховані характеристики АКФ М-последовательностей при рассогласовании по времени, однако при обнаружении воздушных целей важно учитывать данные свойства сигнала и при рассогласовании по частоте, которые обусловлены эффектом Доплера.

В табл. 2 приведены характеристики для АКФ от рассогласования по частоте $\rho(F)$ ($\tau = 0$) анализируемых сигналов. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что средний уровень боковых лепестков в частотной области сигнала сформированного на основе ПСП Лемера ниже чем у М-последовательности, в отличии от шумоподобного сигнала, сформированного на основе применения полинома Чебышева у которого данные характеристики выше.

Для расчета среднеквадратичного отклонения боковых пиков $R_{i,j}$ тел неопределенности исследуемых сигналов выражения (3), (4) перепишем в следующем виде:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{(2N)^2} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N R_{i,j}^2; \quad (6)$$

$$m_{|R|} = \frac{1}{(2N)^2} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N |R_{i,j}|. \quad (7)$$

В табл. 3 приведены полученные значения среднеквадратичские отклонения боковых пиков тел неопределенности в соответствии с выражениями (6), (7), (5) и значения максимального бокового пика.

Из сравнения данных характеристик можно сделать вывод, что тело неопределенности радиоимпульса, полученного с помощью ПСП Лемера, имеет более равномерно распределенный уровень боковых лепестков по сравнению с другими анализируемыми сигналами.

При решении задач радиолокации наиболее важной характеристикой кнопочного тела неопределенности шумоподобного сигнала является максимальное значение боковых пиков. Это объясняется тем, что при обнаружении различных типов целей с различными эффективными площадями рассеивания (ЭПР), отраженный эхо-сигнал от небольшой цели может быть не выделен, так как не превысит максимальный уровень боковых лепестков сигнала отраженного от соседней цели с большей ЭПР. Такая ситуация может возникать при обнаружении бомбардировщиков с группой прикрытия из пары истребителей. Отношение ЭПР различных целей может составлять 10 ... 100 раз.

Поэтому уровень максимальных боковых лепестков применяемых в РЛС сигналов не должен превышать $-20 \dots -30$ дБ по мощности.

Известно, что для М-последовательностей $R_{\max} \approx 1/\sqrt{N}$.

Однако, как отмечено в [7], для различных М-последовательностей уровень максимальных боковых пиков может превышать значение $1/\sqrt{N}$ в 5 ... 6 раз.

Таблица 2

Характеристики корреляционных функций по частоте шумоподобных сигналов ($N = 127$)

Корреляционные функции по частоте	$\sigma_R \sqrt{N}$	$m_{ R } \sqrt{N}$	$\sigma_{ R } \sqrt{N}$	$R_{\max} \sqrt{N}$
АКФ М – последовательностей	0,62	0,42	0,45	2,4
АКФ шумоподобного сигнала на основе ПСП Лемера	0,6	0,4	0,44	2,2
АКФ шумоподобного сигнала на основе полинома Чебышева	0,88	0,77	0,42	2,3

Таблица 3

Характеристики тел неопределенности шумоподобных сигналов ($N = 127$)

Тело неопределенности	$\sigma_R \sqrt{N}$	$m_{ R } \sqrt{N}$	$\sigma_{ R } \sqrt{N}$	$R_{\max} \sqrt{N}$
М – последовательностей	0,69	0,6	0,35	2,4
Шумоподобного сигнала на основе ПСП Лемера	0,65	0,55	0,34	2,2
Шумоподобного сигнала на основе полинома Чебышева	0,7	0,58	0,38	2,5

В табл. 4 приведены значения R_{\max} тел неопределенности шумоподобных сигналов на основе ПСП Лемера и полиномов Чебышева при различных их длительностях. Из таблицы видно, что уровень максимальных боковых пиков АКФ сигнала на основе ПСП Лемера не превышает $2/\sqrt{N}$ и является в 2 ... 3 раза ниже, чем у некоторых М-последовательностей. В случае формирования радиоим-

пульса длительностью 256 дискрет уровень максимальных боковых лепестков составляет -20 дБ по мощности, а при $N = 5000$ R_{\max} составляет -31 дБ.

Следовательно, такие сигналы могут быть применены в качестве зондирующих в РЛС, как альтернативные при модернизации существующих средств радиолокации с целью улучшения их характеристик.

Выводы

Таким образом, корреляционные свойства радиоимпульса, сформированного на основе ПСП Лемера, удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к зондирующим сигналам РЛС. В некоторых случаях характеристики предложенного сигнала лучше, чем у известных М-последовательностей.

Применение таких сигналов в РЛС позволит обеспечить высокую разрешающую способность по дальности и скорости при оптимальном выборе его параметров, обеспечить ЭМС радиоэлектронных средств размещенных на позициях аэродрома, а также повысить их помехозащищенность за счет сложной структуры сигналов.

Таблица 4

Оценки максимальных боковых пиков сигналов сформированных на основе ПСП Лемера и полиномов Чебышева при различных значениях их длительности (количества дискрет N)

Количество дискрет N	256	512	1000	5000	10000
R_{\max} – шумоподобного сигнала на основе ПСП Лемера	0,1	0,08	0,061	0,027	0,02
R_{\max} – шумоподобного сигнала на основе полинома Чебышева	0,113	0,088	0,072	0,039	0,035
$2/\sqrt{N}$	0,125	0,088	0,063	0,028	0,02

Список литературы

1. Васюта К.С. Применение хаотических сигналов в радиолокационном вооружении с целью улучшения его тактических характеристик / К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц // Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки. 4-а наук.-техн. конф., 16 – 20 груд. 2013 р.: тези допов. – К., 2013. – С. 252-253.

2. Непараметрический BDS-обнаружитель хаотических сигналов на фоне белого шума / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, А.Н. Барсуков [и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 1. – С. 23-31.

3. Кушнір А.И. Анализ возможности применения мультипликативного конгруэнтного метода Лемера для стеганографической передачи данных в системе военной радиосвязи / А. И. Кушнір, К. С. Васюта, О.И. Сухаревский и др. // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 4(37). – С. 66-69.

4. Рысаков Н.Д. Военная техника авиационной радиолокации. Вып. 1: Диспетчерский радиолокатор РСР-М2: конспект лекций. – Х.: ХВВАУРЭ, 1989. – 170 с.

5. Рысаков Н.Д. Военная техника авиационной радиолокации. – Вып. 4: РСР-10МН и ВИСР-75Т: конспект лекций. – Х.: ХИЛ ВВС Украины, 1996. – 124 с.

6. Денисова Э.В. Основы вычислительной математики: учебно-методическое пособие / Э.В. Денисова, А.В. Кучер – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 164 с.

7. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / [С.А. Горшков, Д.И. Леховицкий, Н.Н. Минервин и др.]; / под. общ. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО “МАКВИС”, 1998. – 828 с: ил., библи. 539 назв.

8. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

Поступила в редколлегию 9.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Седышев, Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков.

КОРЕЛЯЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ РАДІОІМПУЛЬСУ, СФОРМОВАНОГО ЗА ДОПОМОГОЮ ПСЕВДОВИПАДКОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ЛЕМЕРА

А.І. Кушнір, К.С. Васюта, А.В. Крижний, Ф.Ф. Зоц

У роботі аналізуються кореляційні властивості радіоімпульсу сформованого шляхом частотної модуляції гармонійної несучої псевдовипадковою послідовністю Лемера. Проведено порівняльний аналіз властивостей запропонованого сигналу з відомими шумоподібними сигналами. Показано, що середній рівень і максимальне значення бічних піків тіла невизначеності радіоімпульсу сформованого за допомогою ПСП Лемера менше ніж у сигналу, сформованого на основі полінома Чебишева. Застосування цього сигналу в радіолокаційних системах дозволить забезпечити більш високу скритність їх функціонування, оскільки такий сигнал не має структурованого аттрактору на відміну від М-последовательностей і хаотичних сигналів. Радіоімпульс сформований на основі ПСП Лемера дозволяє забезпечити високу роздільну здатність по дальності і швидкості при максимальному значенні бічних піків не більше $2/\sqrt{N}$.

Ключові слова: шумоподібні сигнали, кореляційні властивості, скритність.

CORRELATION PROPERTIES OF RADIO IMPULSE FORMED BY PSEUDO RANDOM SEQUENCE LEMER

A.I. Kyshnir, K.S. Vasuta, A.V. Kryzhniy, F.F. Zots

Cross-correlation properties of radio impulse formed by frequency modulation by the harmonic bearing pseudo random sequence of Lemer are analyzed in the work. The comparative analysis of properties of the offered signal is conducted with the known noise signals. It is shown that middle level and maximal value of lateral peaks of body of vagueness of radio impulse formed by means of PRS Lemer less than at a signal, formed on the basis of polynomial Chebysheva. Application of this signal in the radar systems will allow to provide higher secrecy of their functioning, because such signal does not have the structured attractor in a difference from M-sequences and chaotic signals. Radio impulse is formed on the basis of PRS Lemer allows to provide a high discriminability on distance and speed at the maximal value of lateral peaks no more $2/\sqrt{N}$.

Keywords: noise signals, correlation properties, secrecy.