

ANALYSIS APERIODIC COMPOUND MULTIPHASE SIGNALS WITH ADDITIONAL MODULATION**АНАЛИЗ АПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВНЫХ МНОГОФАЗНЫХ СИГНАЛОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

V.Koshevyu, DSc, professor, O.Pashenko, PhD student

В.М. Кошевой, д.т.н., профессор, Е.Л. Пашенко, аспирант

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

In this paper we explored the signals with an additional amplitude modulation with controlling pick-factor. Results were obtained for different pick factors of signals. This type of signals can reduce a side-lobes level of the ambiguity function around a central pick. Thus, they have good range and velocity resolution. Compound multiphase signals without an additional amplitude modulation after weighting processing were compared with compound multiphase signals with an additional amplitude modulation after matched processing.

Keywords: ambiguity function, cross ambiguity function, compound signal, additional amplitude modulation.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Одной из важных задач морской радиолокации является разработка судовых радиолокационных станций (РЛС), характеризующихся пониженной пиковой мощностью излучения. Это важно как для обеспечения электромагнитной совместимости, так и для уменьшения вредного воздействия высокочастотного поля на экипаж судна. Решение указанной задачи во многом зависит от выбора соответствующего зондирующего сигнала и методов его обработки. Для этих целей целесообразно применять широкополосные сигналы с большой базой, разновидностью которых являются составные многофазные сигналы [1].

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

В работе [1] были определены параметры функции неопределенности (ФН), при которых обеспечивается максимум отношения площади области, свободной от пиков (ближайших к центральному пику (ЦП)), к площади топографического сечения (по нулевому уровню) самого ЦП ФН. Были

найлены значения параметров сигнала, при которых, за счет некоторого уменьшения указанного выше отношения площадей, достигается уменьшение уровня боковых лепестков (БЛ) по всей длине автокорреляционной функции (АКФ)[2]. В работе [3] были рассмотрены методы синтеза дискретных сигналов с гребнеобразной формой ФН. В работах [1,3,4,5] были изложены основные принципы обработки таких сигналов, а также показано положительное влияние на их взаимную функцию неопределенности (ВФН) и проведены исследования по уменьшению БЛ ВФН за счет весовой обработки. Показано что за счет весовой обработки удается уменьшить уровень БЛ ВФН внутри свободной области (СО), однако, при этом неизбежно возникают потери в отношении сигнал/шум. В работе [6] рассмотрены составные многофазные сигналы с дополнительной амплитудной модуляцией (АМ), позволяющие уменьшить уровень БЛ внутри СО, в отсутствие потерь в отношении сигнал/шум. Рассмотрено влияние различных законов дополнительной амплитудной модуляции составных многофазных сигналов на их структуру и проведен сравнительный анализ их ФН с ВФН составных многофазных сигналов с весовой обработкой.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью данной работы является изучение эффективности использования составных многофазных сигналов с дополнительной АМ. Анализ эффективности обработки и использования рассматриваемых сигналов.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

В соответствии с работой [1], составной многофазный сигнал представляет собой сигнал с квадратичным изменением фаз составляющих последовательность. Выражения комплексных амплитуд базовой (s_n^b) и внешней (s_n^v) последовательностей составного многофазного сигнала имеют следующий вид:

$$s_n^b = \exp\left[j\frac{\pi}{4}\alpha' \left(2 \left((n+1) - E\left[\frac{n}{N_B}\right] N_B \right) - (N_B + 1) \right)^2\right] \quad (1)$$

$$s_n^v = \exp\left[j\frac{\pi}{4}\beta' \left(2 \left(E\left[\frac{n}{N_V}\right] + 1 \right) - (N_V + 1) \right)^2\right], \quad (2)$$

где $n = \overline{0, N-1}$; $\alpha' = \alpha T_0^2$; $\beta' = \beta (T_0 N_0)^2$; α, β – параметры определяющие заданное направление гребней ФН базовой и внешней последовательности соответственно; T_0 – длительность элементарного импульса сигнала; N_B – число импульсов базовой последовательности; N_V – число импульсов внешней последовательности; N – количество импульсов в сигнале; $E[x]$ – целая часть x .

Выражение для расчета апериодической ФН в дискретных точках можно записать в виде:

$$\chi_{ss}(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n^* \cdot s_{n+k} e^{i2\pi l \Delta f n T_0}, \quad (3)$$

где k - дискретные значения задержки и l - дискретные значения частоты с выбранным шагом соответственно T_0 и $\Delta f = 1/4NT_0$.

Рассмотрены два аperiodических составных многофазных сигнала длиной $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) со следующими значениями коэффициентов:

1) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$. В работе [1] показано, что сигнал с такими параметрами имеет максимальное значение отношения площади СО вокруг ЦП ФН к площади топографического сечения ЦП по нулевому уровню.

2) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B$. За счет применения данного набора коэффициентов уровень БЛ в центральной области увеличивается, но при этом он самый низкий по всей длине АКФ (рис.2). Также следует отметить, что уменьшается СО вокруг ЦП ФН[2].

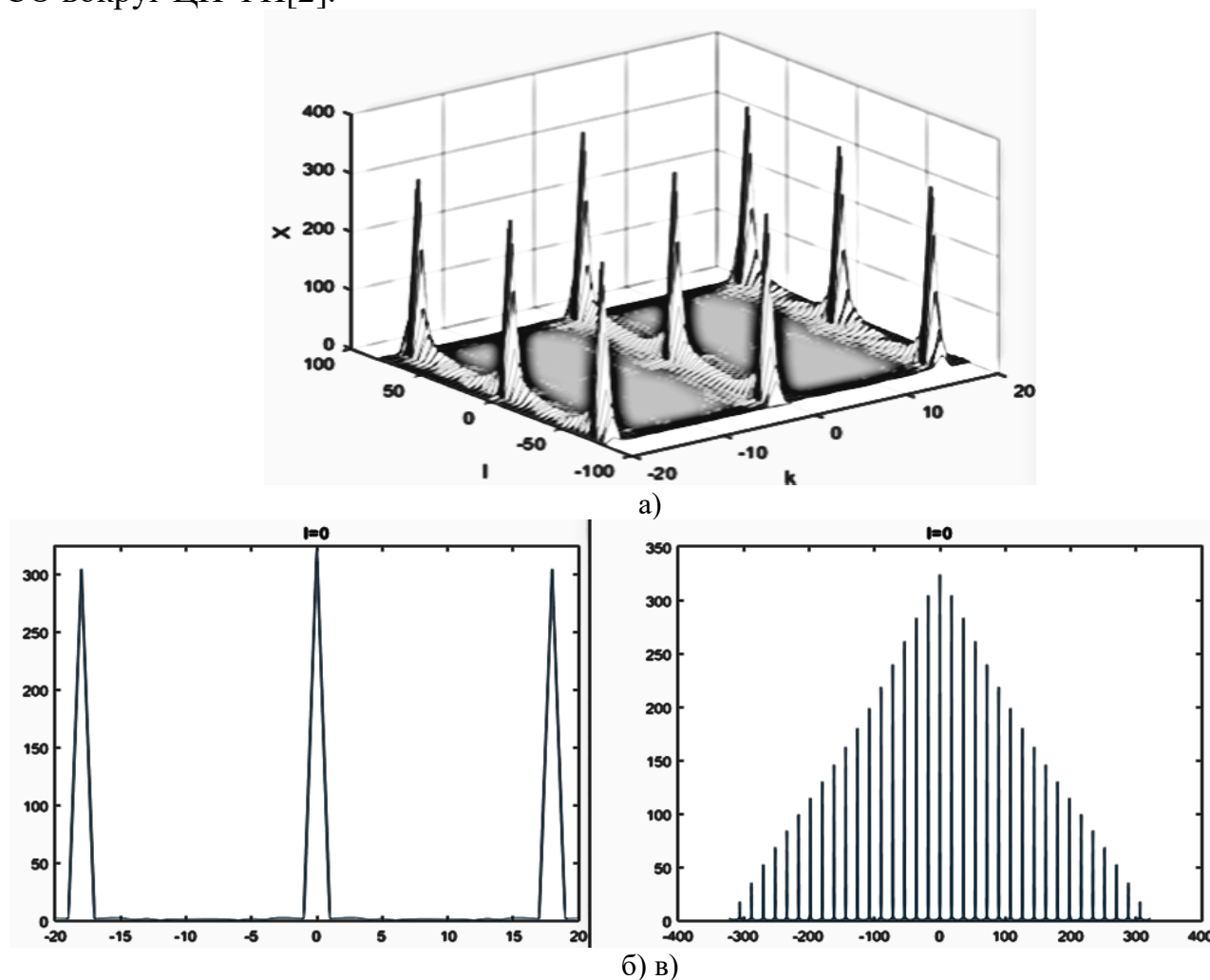


Рис. 1. а) Тело ФН аperiodического составного многофазного сигнала $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$ (согласованная обработка); б) сечение АКФ в центральной области ФН; в) сечение АКФ по всей длине

На рис.1,2 приведены ФН и АКФ двух рассматриваемых аperiodических многофазных сигналов. На рис.1 отношение уровня ЦП к уровню БЛ в СО ФН составляет 49 дБ, а на рис. 2 26 дБ.

Уменьшить уровень БЛ ВФН составного многофазного сигнала (1), (2) можно за счет весовой обработки.

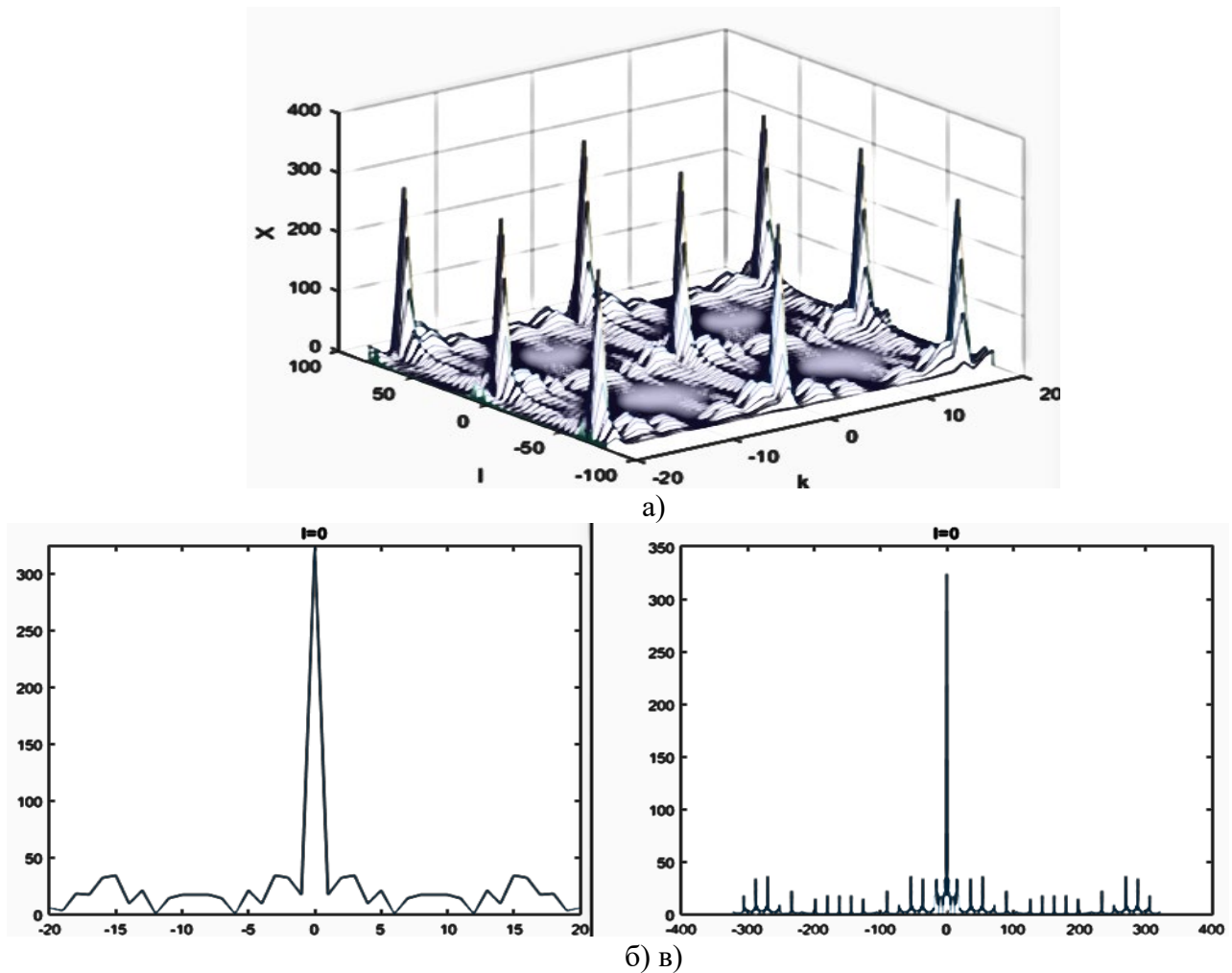


Рис. 2. а) Тело ФН аperiodического составного многофазного сигнала $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B$ (согласованная обработка); б) сечение АКФ в центральной области ФН; в) сечение АКФ по всей длине

Весовая функция рассогласованной обработки составного многофазного сигнала без дополнительной АМ может быть записана в виде:

$$w_n = s_n \cdot v_n$$

$$v_n = v_{n-E[n/N_B]N_B}^B v_{E\left[\frac{n}{N_V}\right]+1}^V, \quad n = \overline{0 \div N-1}, \quad (4)$$

где $v_{n-E[n/N_B]N_B}^B$ – весовые коэффициенты для базовой последовательности; $v_{E\left[\frac{n}{N_V}\right]+1}^V$ – весовые коэффициенты для внешней последовательности[1].

В качестве одного из критериев для оценки результатов и сравнительного анализа используем показатель потерь в отношении сигнал/шум:

$$\rho = \frac{|\chi_{sw}(0,0)|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |s_n|^2 \sum_{n=0}^{N-1} |w_n|^2}, \quad (5)$$

где ρ – потери в отношении мощности сигнала к мощности шума; s_n – комплексные огибающие сигнала; w_n – комплексные огибающие фильтра;

$\chi_{sw}(0,0)$ - значение ВФН при отсутствии частотного и временного сдвига ($l=0, k=0$).

Рассмотрено несколько разновидностей возможных весовых функций. В качестве одной из возможных рассмотрена весовая функция *sin*:

$$\begin{aligned} v_n^B &= \sin \left[\pi \left(\frac{y_B}{N_B+1} + \frac{n}{N_B+z_B} \right) \right], n=0 \div N_B-1 \\ v_n^V &= \sin \left[\pi \left(\frac{y_V}{N_V+1} + \frac{n}{N_V+z_V} \right) \right], n=0 \div N_V-1, \end{aligned} \quad (6)$$

где y_B, y_V - натуральное число для базовой и внешней последовательности соответственно, изменяется в пределах $1 \leq y_B < \frac{N_B+1}{2}, 1 \leq y_V < \frac{N_V+1}{2}$; z_B, z_V - переменные для базовой и внешней последовательности соответственно, $z_B = \frac{2y_B N_B - (N_B+1)}{N_B+1 - 2y_B}, z_V = \frac{2y_V N_V - (N_V+1)}{N_V+1 - 2y_V}$.

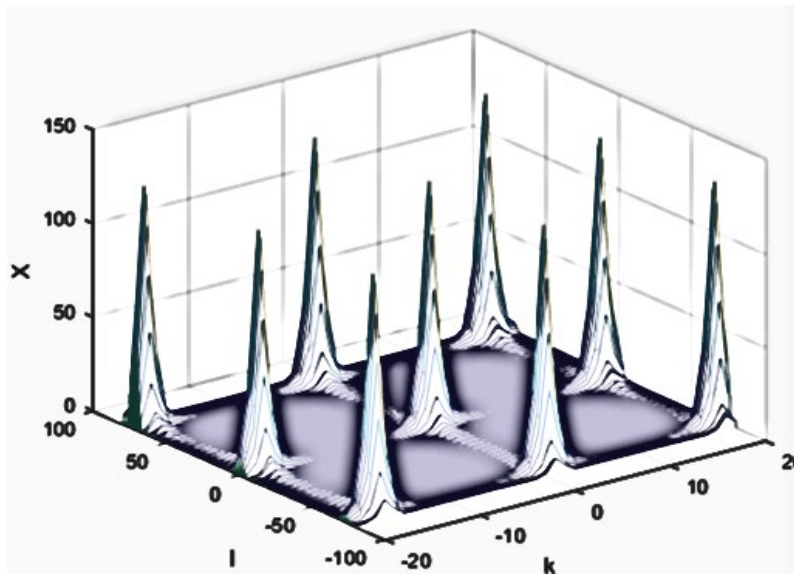


Рис. 3. Тело ВФН аperiodического составного многофазного сигнала с прямоугольной огибающей при $N=324$ ($N_B=18, N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B^2, y_V=y_B=1$ (рассогласованная обработка) с применением весовых коэффициентов *sin*

На рис. 3,4 приведен случай рассогласованной обработки составных многофазных сигналов, весовые коэффициенты фильтра для которых рассчитаны по формуле (6). Отношение уровня ЦП к уровню БЛ в СО ВФН при $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B^2$ (рис.3) составляет 60 дБ, а при $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B$ (рис.4) 30 дБ. Потери в отношении сигнал/шум составляют $\rho=0,73$ (-1,4 дБ).

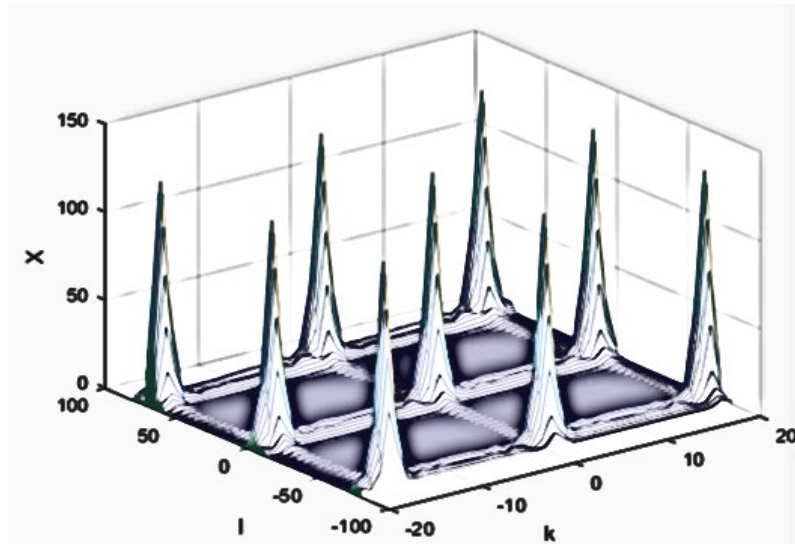


Рис. 4. Тело ВФН аperiodического составного многофазного сигнала с прямоугольной огибающей при $N=324$ ($N_B=18, N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B, y_v=y_B=1$ (расогласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin

Преобразуя формулу (6) получена новая весовая функция. Назовём ее весовой функцией \sin^2

$$v_n^B = \left[\sin\left(\pi\left(\frac{y_B}{N_B+1} + \frac{n}{N_B+z_B}\right)\right) \right]^2, n=0 \div N_B-1 \tag{7}$$

$$v_n^V = \left[\sin\left(\pi\left(\frac{y_V}{N_V+1} + \frac{n}{N_V+z_V}\right)\right) \right]^2, n=0 \div N_V-1$$

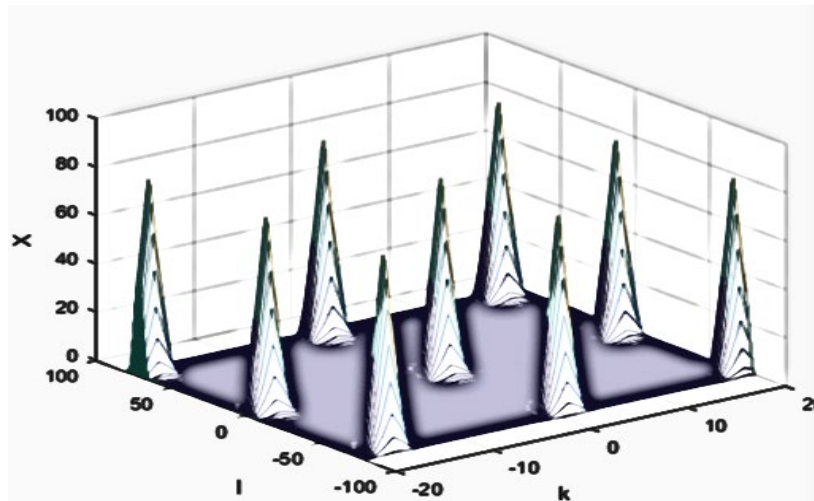


Рис. 5. Тело ВФН аperiodического составного многофазного сигнала с прямоугольной огибающей при $N=324$ ($N_B=18, N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B^2, y_v=y_B=1$ (расогласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin^2

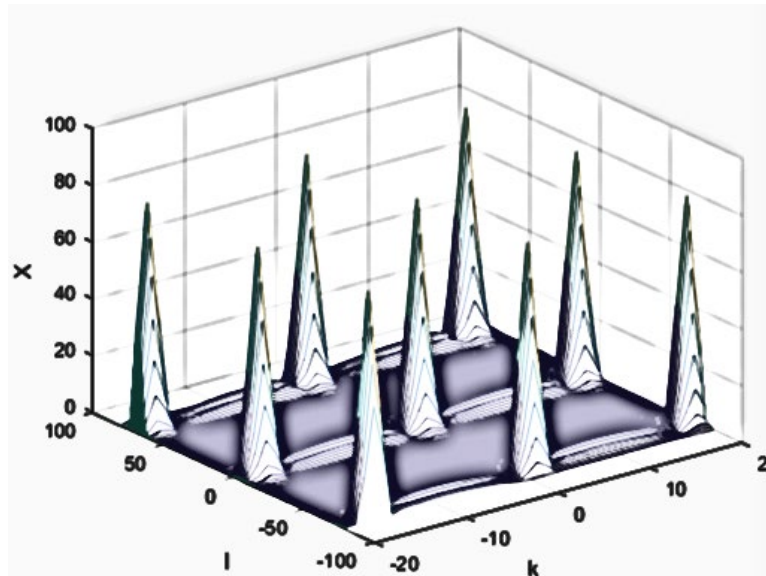


Рис. 6. Тело ВФН аperiodического составного многофазного сигнала с прямоугольной огибающей при $N=324$ ($N_B=18, N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B, y_v=y_B=1$ (рассогласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin^2

На рис. 5,6 приведен случай рассогласованной обработки составных многофазных сигналов, весовые коэффициенты фильтра для которых рассчитаны по формуле (7). Отношение уровня ЦП к уровню БЛ в СО ВФН при $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B^2$ (рис.5) составляет 71дБ, а при $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B$ (рис.6) 31дБ. Потери в отношении сигнал/шум $\rho=0,5$ (-3 дБ).

Рассмотрен также рассогласованный фильтр, полученный на основе весовых коэффициентов Хэмминга. Ниже приведена формула для расчета весовых коэффициентов:

$$v_n^B = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N_B-1}\right), n = 0 \div N_B - 1 \quad (8)$$

$$v_n^V = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N_V-1}\right), n = 0 \div N_V - 1$$

При рассогласованной обработке составных многофазных сигналов, весовые коэффициенты фильтра для которых рассчитаны по формуле (8), отношение уровня ЦП к уровню БЛ в СО при $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B^2$ составляет 53дБ, а при $\alpha'=-1/N_B, \beta'=1/N_B$ 31 дБ. Потери в отношении сигнал/шум $\rho=0,53$ (-2,8 дБ).

Другим способом снижения уровня БЛ ФН является использование составных многофазных сигналов с дополнительной АМ [6]. В предыдущих случаях весовые коэффициенты были рассчитаны для фильтра, а в данном случае они выступают весовыми коэффициентами сигнала. Сигналы с дополнительной АМ можно описать следующим выражением:

$$S_n^{am} = S_n * v_n$$

$$v_n = v_{n-E[n/N_B]N_B}^b * v_{E[\frac{n}{N_V}]_{+1}}^v, n = \overline{0 \div N - 1}, \quad (9)$$

где s_n^{am} - составной многофазный сигнала с дополнительной АМ; s_n - комплексная огибающая сигнала; v_n^b , v_n^v - весовые коэффициенты определяющие характер АМ для базовой и внешней последовательности.

Выражение для аperiodической ФН составного многофазного сигнала с дополнительной АМ примет вид:

$$\chi_{ss}(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n^{am*} \cdot s_{(n+k)}^{am} e^{i \frac{2\pi \Delta f n}{4N}} \quad (10)$$

Для анализа составных многофазных сигналов с дополнительной АМ, используем пик-фактор, который определяется как отношение максимальной амплитуды сигнала (s_{max}^{am}) к среднеквадратичному значению всех его амплитуд:

$$\xi = \frac{|s_{max}^{am}|^2 N}{\sum_{n=0}^{N-1} |s_n^{am}|^2} \quad (11)$$

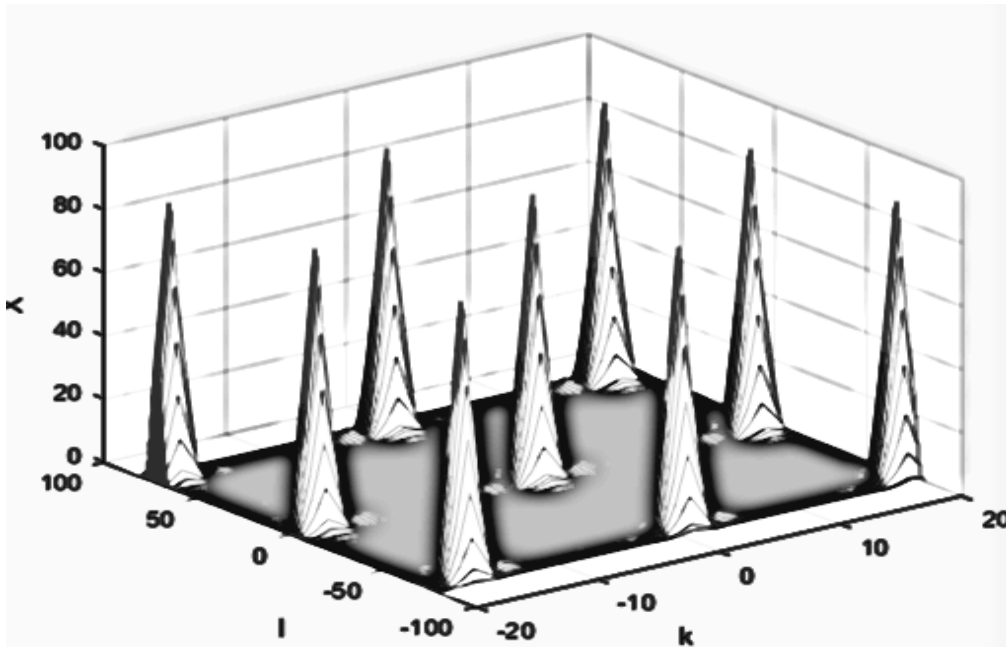


Рис. 7. Тело ФН аperiodического составного многофазного сигнала с дополнительной АМ $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$, $y_v=y_B=1$ (согласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin

После согласованной обработки составных многофазных сигналов с дополнительной АМ (функция \sin определяет модуляцию всего сигнала (6)) отношение уровня ЦПк уровню БЛ ФН при коэффициентах $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$ (рис.7) составляет 40 дБ. На рис. 8 при коэффициентах $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$ это отношение составило 45 дБ. Величина пик-фактора (11) рассмотренных сигналов (рис.7,8) составляет 3,59.

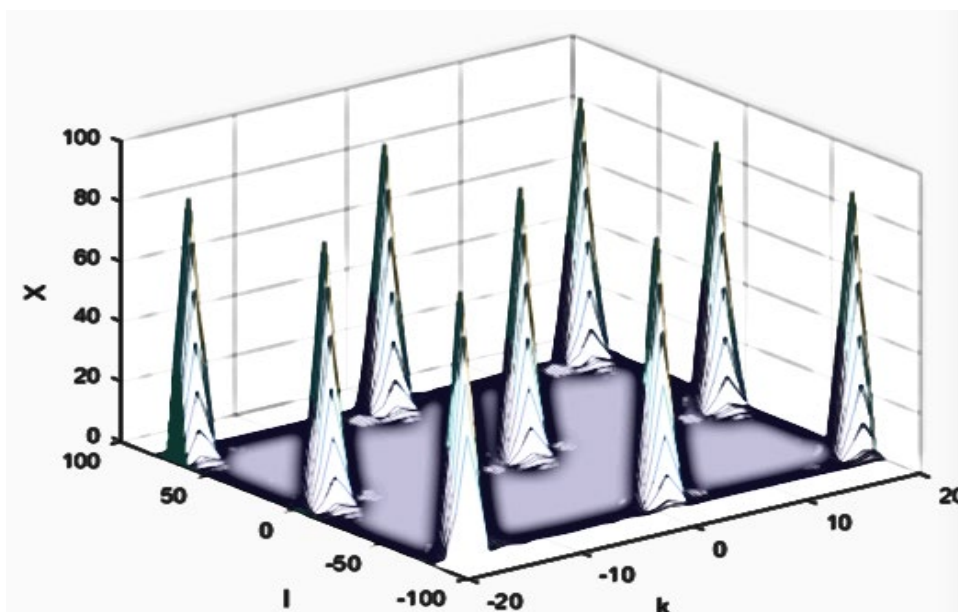


Рис. 8. Тело ФН аperiodического составного многофазного сигнала с дополнительной АМ $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B$, $y_V=y_B=1$ (согласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin

На рис. 9,10 приведены ФН составных многофазных сигналов с дополнительной АМ с учетом весовых коэффициентов (7) \sin^2 . Уровень БЛ при этом в обоих случаях снизился до нулевого уровня. Пик-фактор составляет 6,38.

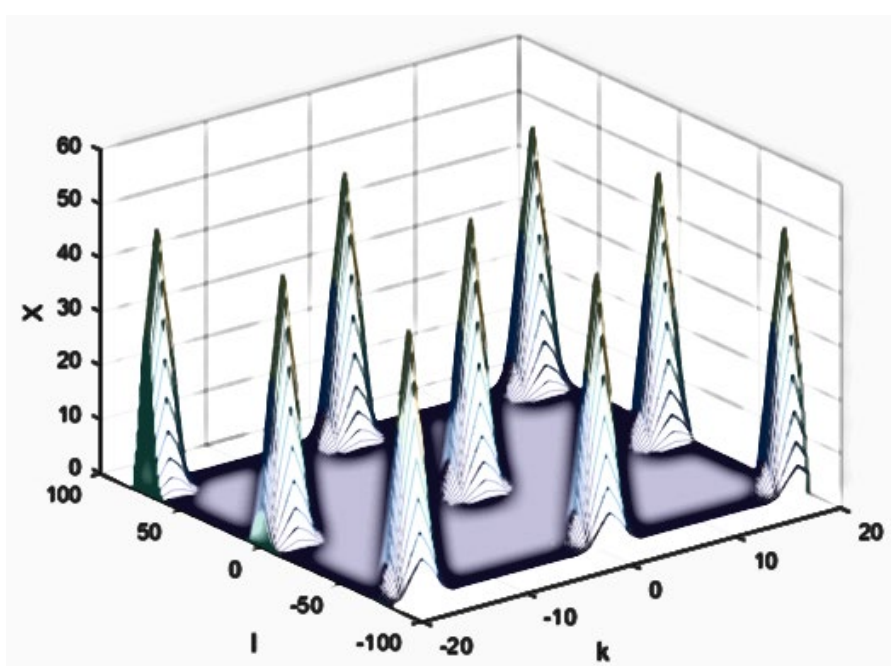


Рис. 9. Тело ФН аperiodического составного многофазного сигнала с дополнительной АМ $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$ (согласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin^2

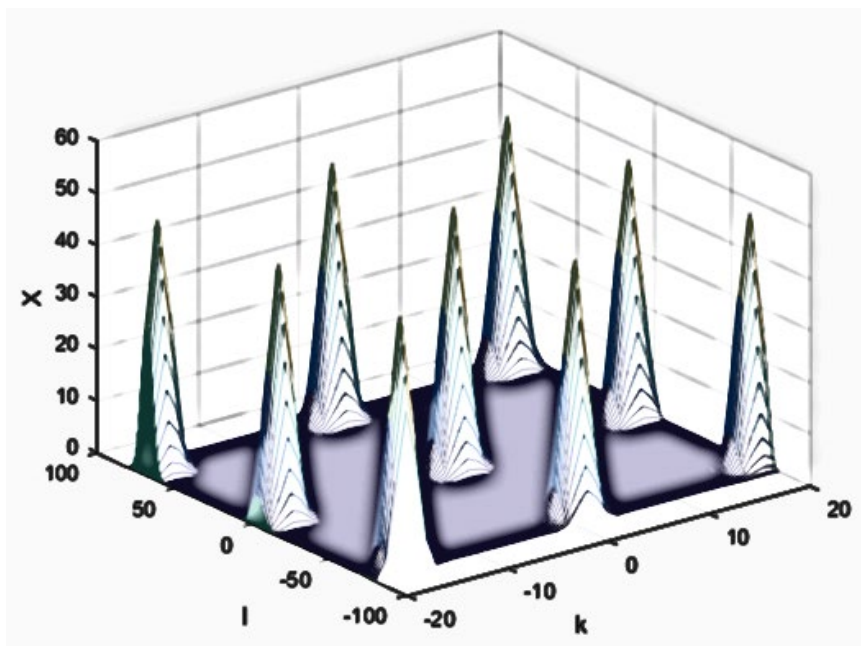


Рис. 10. Тело ФН аperiodического составного многофазного сигнала с дополнительной АМ $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B$ (согласованная обработка) с применением весовых коэффициентов \sin^2

Отношение уровня ЦП к уровню БЛ в СО ФН составных многофазных сигналов с дополнительной АМ, сформированных на основе весовых коэффициентов Хэмминга (8), при $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$ составило 49 дБ, а при $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B$ это 37 дБ. Пик-фактор имеет значение 7,09. Недостатком таких сигналов является увеличение площади сечения ЦП ФН, что приводит к уменьшению отношения площади СО к площади ЦП, увеличению пик-фактора. Как следствие ухудшение их разрешающей способности.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Можно сделать вывод, что наилучшие результаты по критерию отношения уровня ЦП к уровню БЛ ФН показала согласованная обработка составного многофазного сигнала с дополнительной АМ. В данном случае потери в отношении сигнал/шум отсутствуют. При этом самый низкий уровень БЛ имеет сигнал с дополнительной АМ, полученный по функции \sin^2 . Уровень БЛ близок к нулевому уровню. При необходимости большого подавления БЛ ФН возможно использование составных многофазных сигналов, сформированных на основе весовых коэффициентов \sin^2 .

Необходимо отметить, что наилучший пик-фактор имеет сигнал, полученный на основе весовой функции \sin . Он составил 3,59. Отношение уровня ЦП к уровню БЛ в СО ФН для составного многофазного сигнала с дополнительной АМ, сформированного на основе весовой функции \sin , при $N=324$ ($N_B=18$, $N_V=18$) $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B^2$ (согласованная обработка) составило 40 дБ, а при $\alpha'=-1/N_B$, $\beta'=1/N_B$ 45 дБ. При этом у составных многофазных сигналов с дополнительной АМ сохраняется многопиковая структура, но

увеличивается площадь топографического сечения ЦП по нулевому уровню на 2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошевой В.М. Синтез составных многофазных сигналов// Изв. высш. учебн. заведений. Радиоэлектроника.-1988.-Том 31, № 8.- с.56-58.
2. Кошевой В.М., Купровский В.И. Исследование свойств составных многофазных сигналов// Изв. высш. учебн. заведений. Радиоэлектроника.- 1991. - №8.- с. 63-66.
3. Кошевой В.М., Кононов А. А. Синтез оптимальных одноканальных дискретных сигналов и фильтров// Изв. вузов. Радиоэлектроника.-1984.-Том 27, № 8.- с.62-65.
4. Кошевой В.М., Пашенко Е.Л. Анализ эффективности обработки составных многофазных и ЛЧМ сигналов // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С.
5. V.Koshevyu, O.Pashenko. Signal Processing Optimization in the FMCW Navigational Radars// TransNav.Activities in Navigation. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. CRCPress. Taylor&FrancisGroup – 2015 - pp.95-99.
6. В.М.Кошевой, Е.Л.Пашенко. Анализ эффективности обработки составных многофазных сигналов с дополнительной амплитудной модуляцией. ОНМА. Одесса. Тезисы. Конференция: "Практичні проблеми розвитку радіозв'язку і радіонавігації" 2015.