

УДК 621.376

ФАЗОВАЯ И ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ НОВЫМИ КОМПЛЕКСНЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ

Ненашев В.А., Чембарисова Р.И.

В настоящее время в системах радиолокации и радионавигации широко применяются сигналы, модулированные М-последовательностью благодаря их уникальным корреляционным свойствам. Однако довольно высокие уровни боковых лепестков (БЛ) автокорреляционной функции (АКФ) могут негативно сказываться на корректности функционирования систем обнаружения. Поэтому актуальной задачей является поиск новых комплексных последовательностей, обладающих более низкими уровнями БЛ нормированной автокорреляционной функции (НАКФ), а также генерация сигналов, модулированных ими. Целью данного исследования является поиск новых комплексных последовательностей на основе традиционных М-последовательностей, для которых уровень БЛ НАКФ ниже. Это понижение уровней БЛ НАКФ достигается за счет замены традиционного симметричного алфавита, состоящего из положительных и отрицательных единиц на несимметричный, состоящий из положительных единиц и комплексного значения в структуре М-последовательности. В рамках данного исследования следует проанализировать характер изменения БЛ НАКФ и определить комплексные значения, при которых уровни БЛ НАКФ будут наименьшими для новых комплексных последовательностей. В исследовании используются численные методы поиска комплексных значений последовательностей. Проводятся компьютерные эксперименты для оценки уровней БЛ НАКФ на основе полученных выражений, описывающих характер изменения каждого БЛ НАКФ. Кроме того, исследуется фазовая модуляция сигнала сгенерированной комплексной последовательностью, а также широтно-импульсная модуляция с варьируемой амплитудой и шириной элементарных импульсов. Анализируются автокорреляционные свойства полученных сигналов, модулированных одновременно по фазе и ширине. Полученные результаты включают графики аналитических зависимостей, описывающие уровни БЛ НАКФ, по которым и осуществляется поиск значений комплексных последовательностей, а также анализируются изменения ширины главного лепестка и БЛ НАКФ в зависимости от длительности элементарного импульса при разных коэффициентах заполнения. Практическое использование комплексных последовательностей и модулированных по ним сигналов, подтвердило улучшение их корреляционных свойств. Такое улучшение может быть использовано в малогабаритных бортовых радиолокационных и радионавигационных системах.

Ключевые слова: М-последовательность; комплексная последовательность; автокорреляционная функция; боковые лепестки; анализ последовательностей; фазовая

модуляция; широтно-импульсная модуляция; системы радиолокации и радионавигации.

Введение

В радиолокационных системах [1, 2] сигналы, модулированные М-последовательностью, применяются для генерации зондирующих сигналов, что позволяет повысить точность определения дальности до объектов и обеспечить их обнаружение с высокой вероятностью. Кроме того, М-последовательности играют важную роль в разработке многопозиционных систем бортового контроля, используемых в авиационных и космических комплексах [3, 4].

При исследовании свойств последовательностей актуальной задачей является уменьшение уровней боковых лепестков (БЛ) нормированной автокорреляционной функции (НАКФ), что обеспечивается генерацией новых последовательностей через замену отрицательных элементов кода в структуре М-последовательности.

Научная школа профессора В. Ипатова внесла значительный вклад в теорию широкополосных сигналов для радиолокации, разработав методы формирования троичных М-последовательностей с нулевыми БЛ автокорреляционной функции (АКФ), в которых предложен подход к построению фильтров Ипатова для компенсации БЛ АКФ. Троичные М-последовательности с нулевыми БЛ АКФ представляют собой специальные кодовые последовательности, имеющие алфавит $[-1; 0; +1]$. Их основная особенность – идеальная АКФ, у которой БЛ равны нулю. Фильтры Ипатова разработаны для подавления БЛ АКФ, которые возникают при использовании сигналов, модулированных такими последовательностями. [5].

В данной статье предлагается способ генерации новых комплексных последовательностей с более низкими БЛ АКФ на основе традиционных двоичных М-последовательностей, а также ставится задача по дальнейшим исследованиям.

1 Генерация новых комплексных последовательностей

Одним из способов решения задачи уменьшения БЛ АКФ является отказ от традиционного симметричного алфавита, состоящего из $[1; -1]$ в пользу несимметричного $[1; -q]$, где отрицательный элемент может быть действительным и комплексным числом.

В комплексном представлении отрицательные элементы последовательности q можно представить в экспоненциальной форме $\exp(\varphi i)$, где φ – угол, определяющий направление единичного вектора на комплексной плоскости. Эта форма удобна для последующей фазовой модуляции элементарных импульсов с единичной амплитудой при генерации зондирующих сигналов. Введение в структуру М-последовательности комплексных значений позволит найти последовательность с новыми значениями, у которой уровни БЛ НАКФ ниже, чем у традиционных.

На рисунке 1 продемонстрированы две модификации стандартной М-последовательности, при которых бинарный алфавит $[1; -1]$ заменяется в пределах исходной структуры на действительный, но несимметричный алфавит $[1; -a]$ (см. рисунок 1а), а также на комплексный несимметричный алфавит с элементами, принимающими значения $[1; -\exp(\varphi i)]$ (см. рисунок 1б).

$-a - a \ 1$	$-\exp(\varphi i) \ 1$
$-a - a \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 - a \ 1 - a \ 1 \ 1 - a$ $- a \ 1 - a$	$-\exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i)$ $1 - \exp(\varphi i)$
$-a \ 1 \ 1 - a \ 1 - a - a \ 1 - a - a - a$ $- a \ 1 - a \ 1 - a \ 1 \ 1 \ 1 - a \ 1 \ 1 - a$ $- a - a \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 - a$	$-\exp(\varphi i) \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) -$ $\exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i)$ $-\exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i)$
$-a - a \ 1 \ 1 \ 1 - a - a - a - a \ 1 \ 1$ $- a \ 1 - a \ 1 - a - a \ 1 - a - a - a \ 1$ $- a \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 - a \ 1 \ 1$	$-\exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 -$ $\exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) - \exp(\varphi i) -$ $\exp(\varphi i) \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 - \exp(\varphi i) \ 1 \ 1$

Поиск действительных значений «а» при замене отрицательных элементов в последовательностях длиной $N = 15, 31, 63, 127, 255, 511$ ранее были определены в работе [6]. В связи с этим далее следует сосредоточиться на замене отрицательных элементов на комплексные значения.

2 Поиск комплексных значений для отрицательных элементов последовательностей и оценка уровней боковых лепестков нормированной автокорреляционной функции

Дальнейшие исследования будут сосредоточены на получении последовательностей, основанных на замене отрицательных элементов в структуре традиционной М-последовательности с «-1» на комплексное значение « $-\exp(\varphi i)$ », чтобы получить аналитические выражения, описывающие характер поведения БЛ с целью поиска значений «φ» при которых максимальный уровень БЛ НАКФ будет наименьшим. Способ получения аналитических выражений для поиска новых значений элементов бинарной последовательности описан в работе [6].

На рисунке 2а и 2б представлена зависимость БЛ НАКФ от начальной фазы φ элементарных импульсов двух комплексных последовательностей одинаковой длины $N = 7$, основанных на М-последовательностях с различными порождающими полиномами (см. таблицу 1 №1 и №2). Как видно из графиков, наименьший уровень БЛ НАКФ этих двух последовательностей достигается при одинаковой начальной фазе φ, которая соответствует значениям: 41.4° и 318.6° .

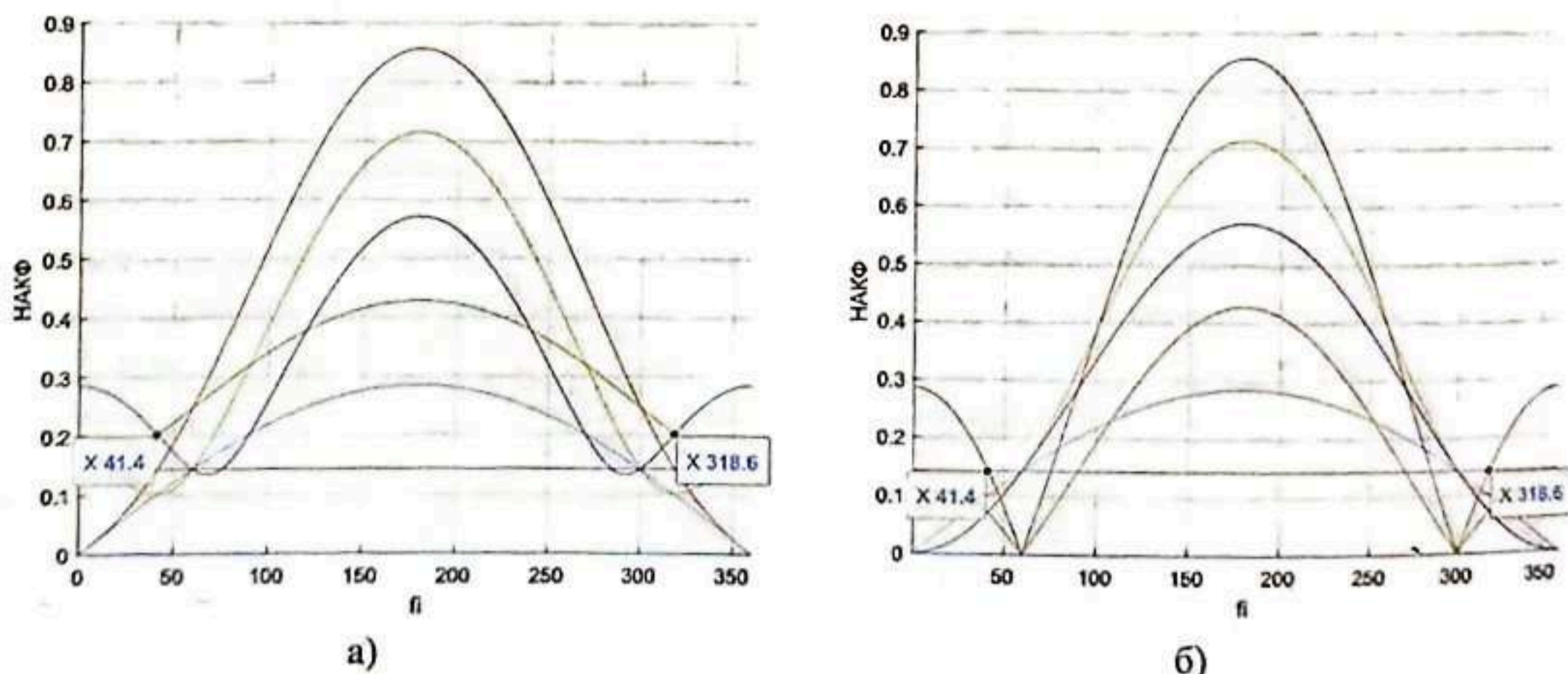


Рисунок 2 – Зависимость уровня БЛ НАКФ комплексной последовательности от параметра φ: а) последовательность №1; б) последовательность №2

На рисунке 3а и 3б показана разница уровней БЛ НАКФ последовательностей №1 и №2, где видно, что у новых комплексных последовательностей более низкие БЛ НАКФ, чем у традиционных М-последовательностей.

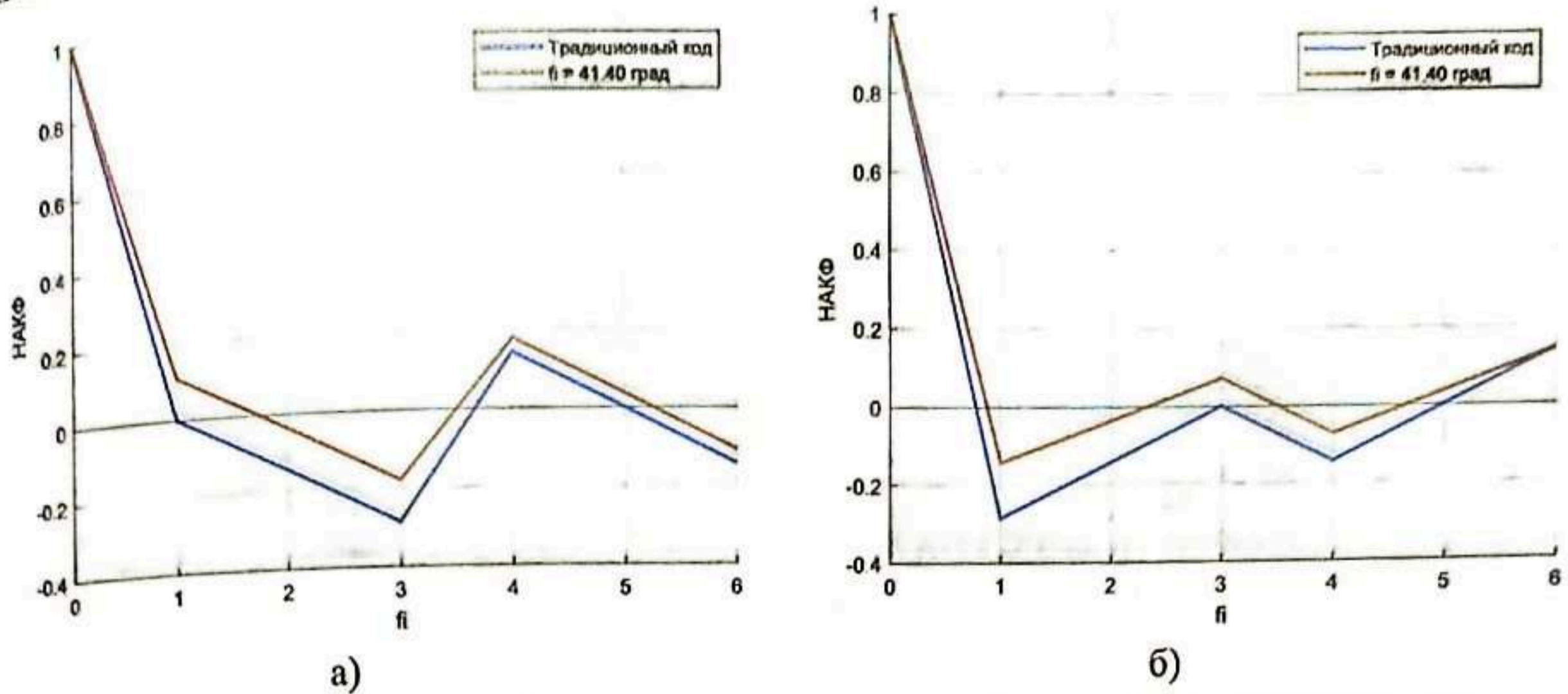
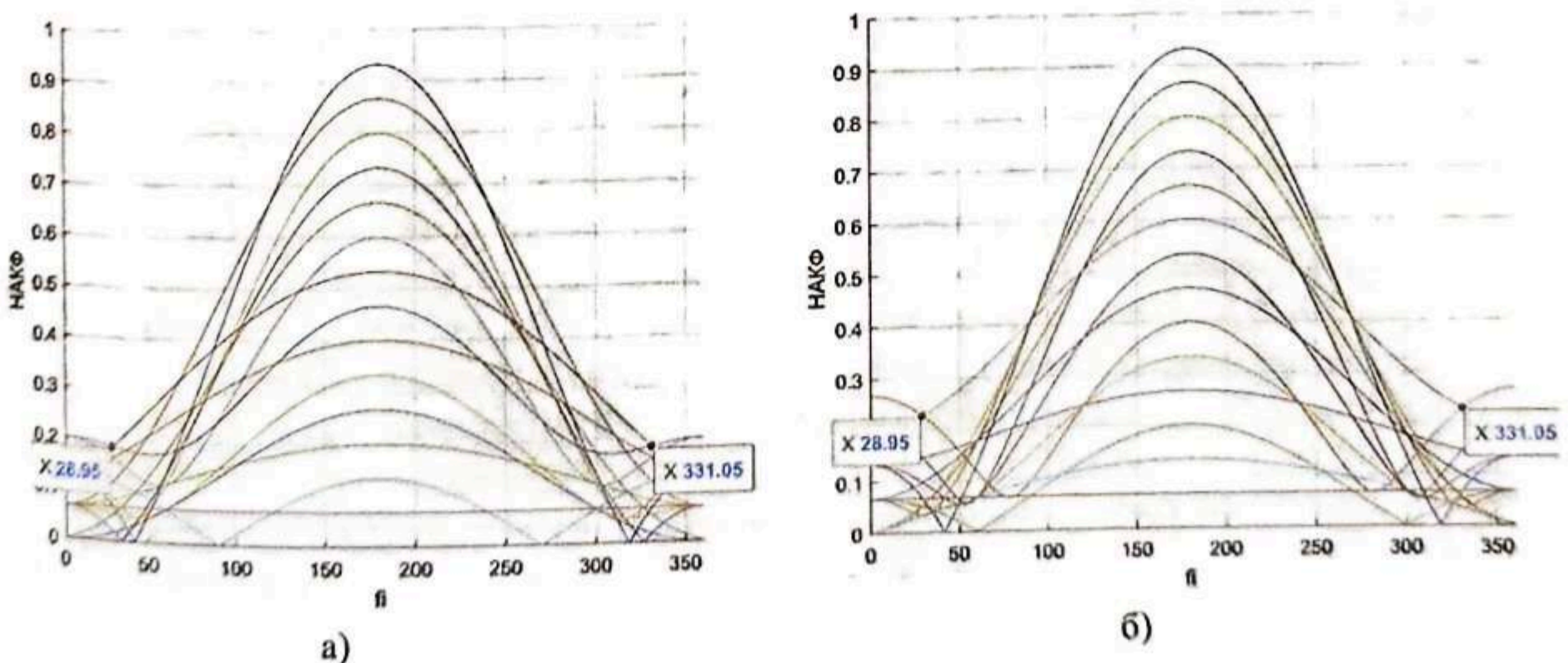


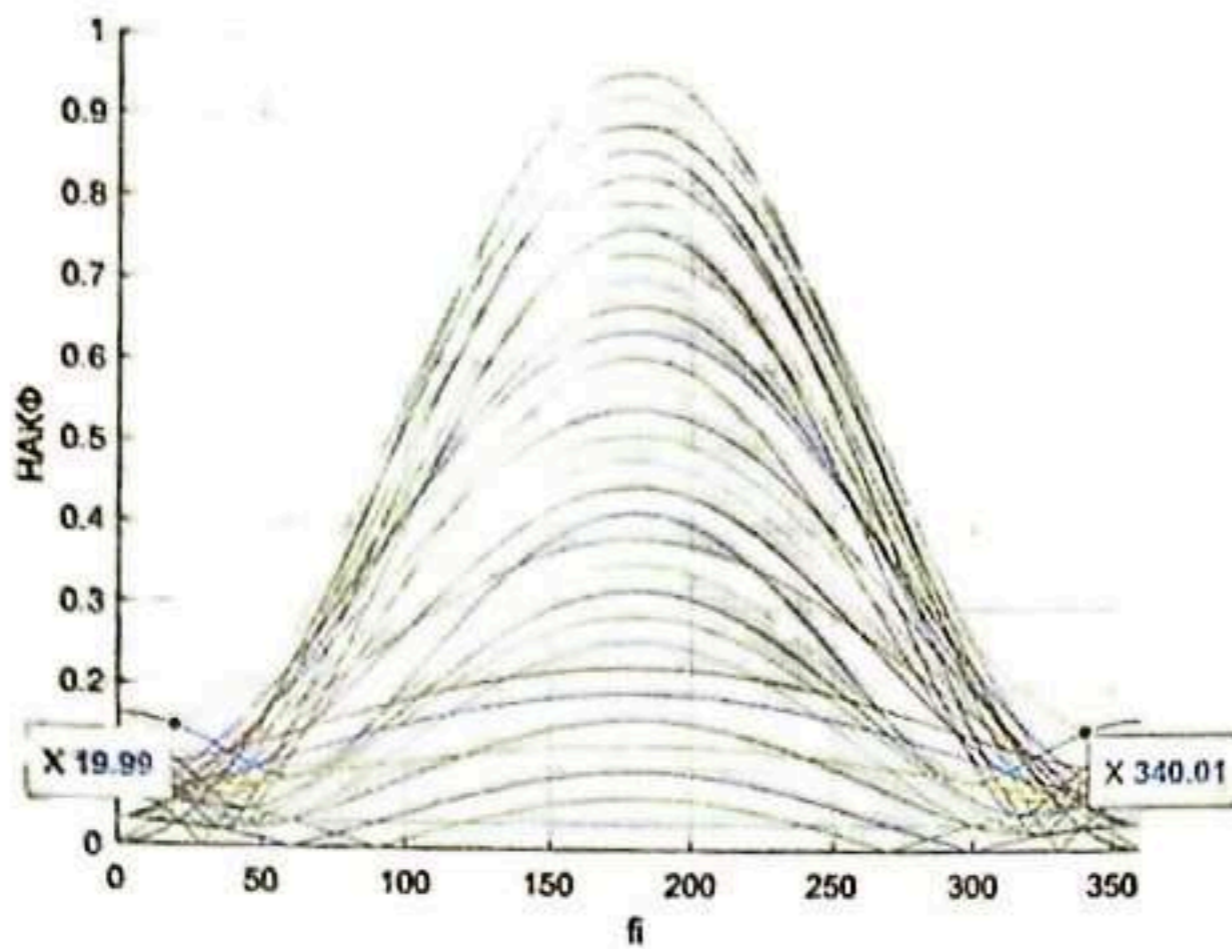
Рисунок 3 – НАКФ традиционной М-последовательности и комплексной последовательности на ее основе: а) последовательность №1; б) последовательность №2

Аналогично выше рассмотренным последовательностям длины $N = 7$, далее рассмотрены М-последовательности с длинами $N = 15$ и $N = 31$. На рисунке 4 приведена зависимость НАКФ комплексных последовательностей (№3, №4, №5 и №6 соответственно) в зависимости от параметра φ .

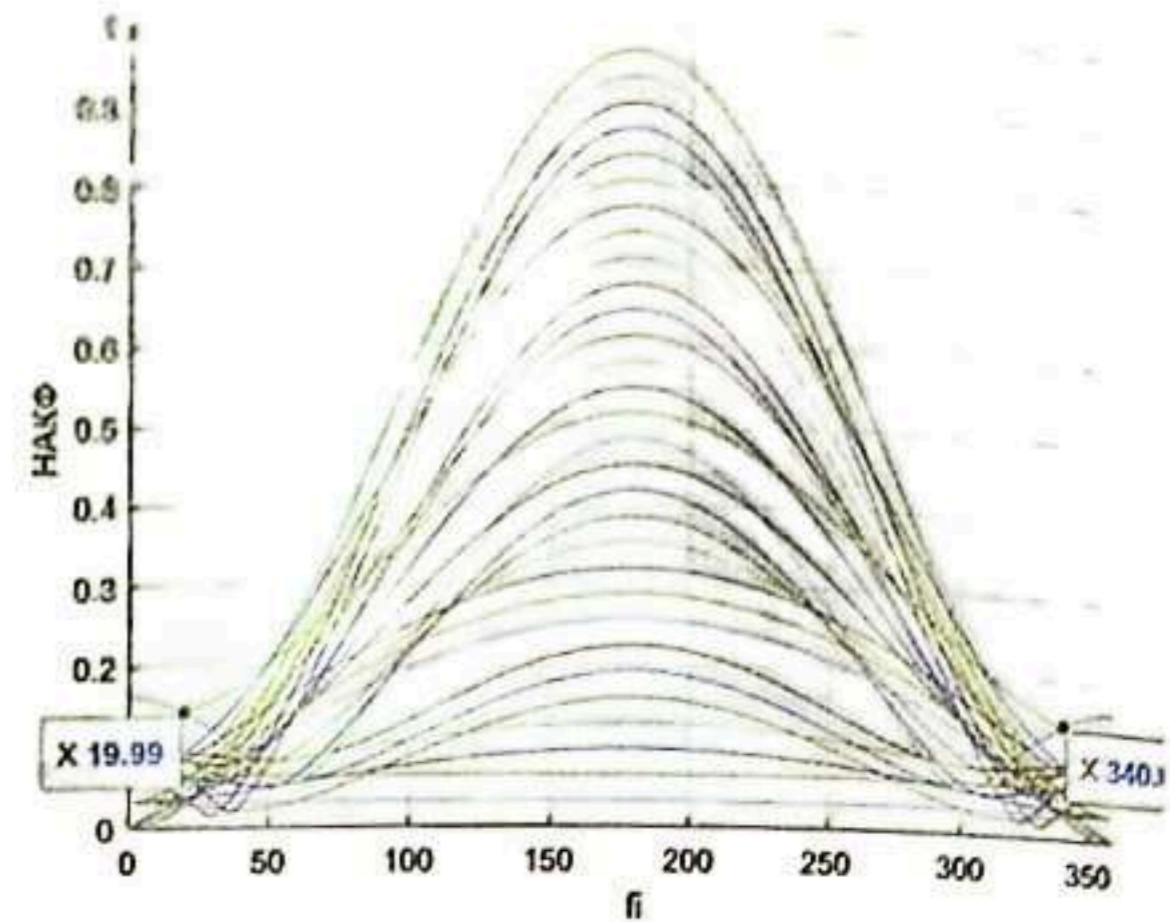
Как видно из приведенных выше графиков, для комплексных последовательностей с длиной $N = 15$ оптимальными начальными фазами являются $\varphi_1 = 28.95^\circ$ и $\varphi_2 = 331.05^\circ$, а для последовательностей с длиной $N = 31$ – $\varphi_1 = 19.99^\circ$, $\varphi_2 = 340.01^\circ$. На рисунке 5 видно уменьшение БЛ НАКФ комплексных последовательностей относительно традиционных М-последовательностей.

Аналогично рассмотренным выше аperiodическим НАКФ комплексных последовательностей, уровни их БЛ периодических НАКФ также становятся ниже. На рисунке 6 представлены зависимости БЛ периодических НАКФ М-последовательностей от найденных параметров φ .



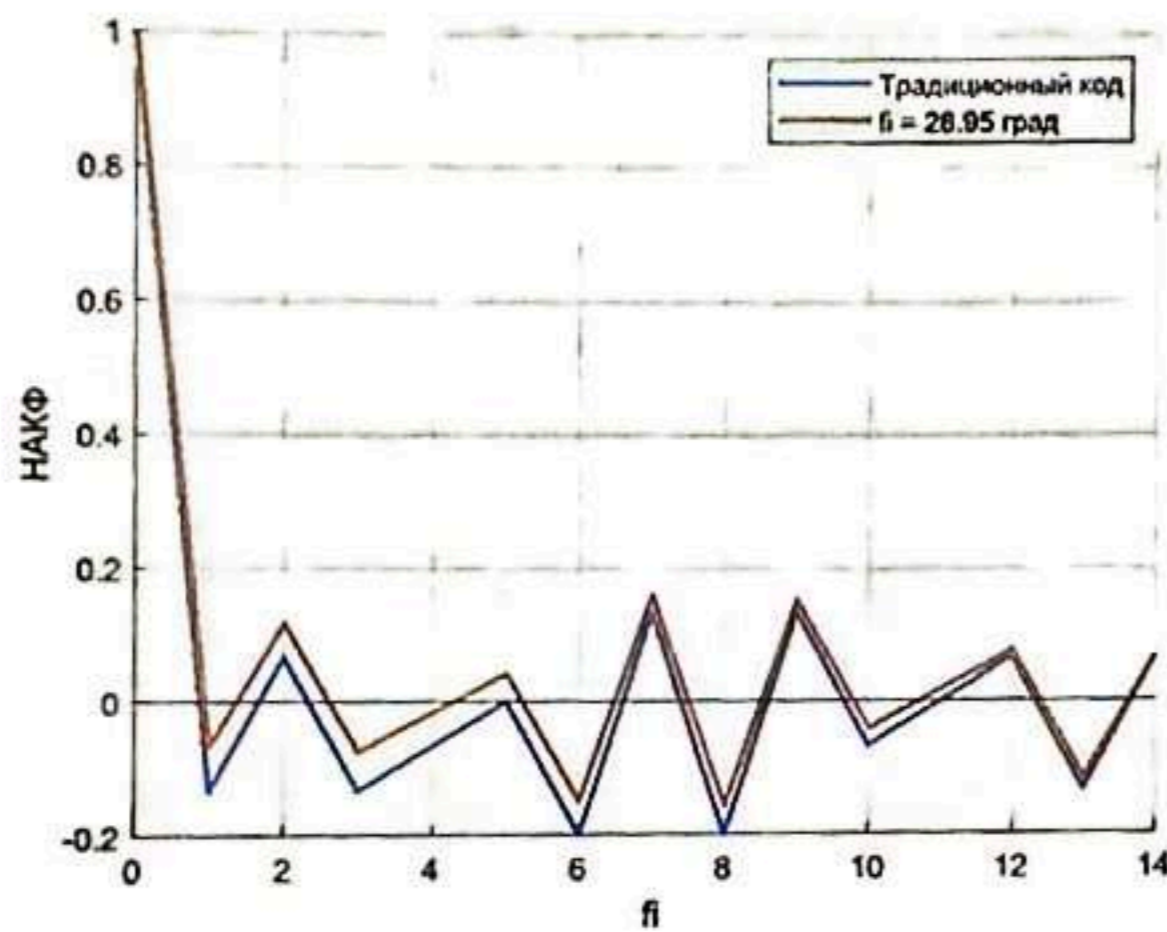


в)

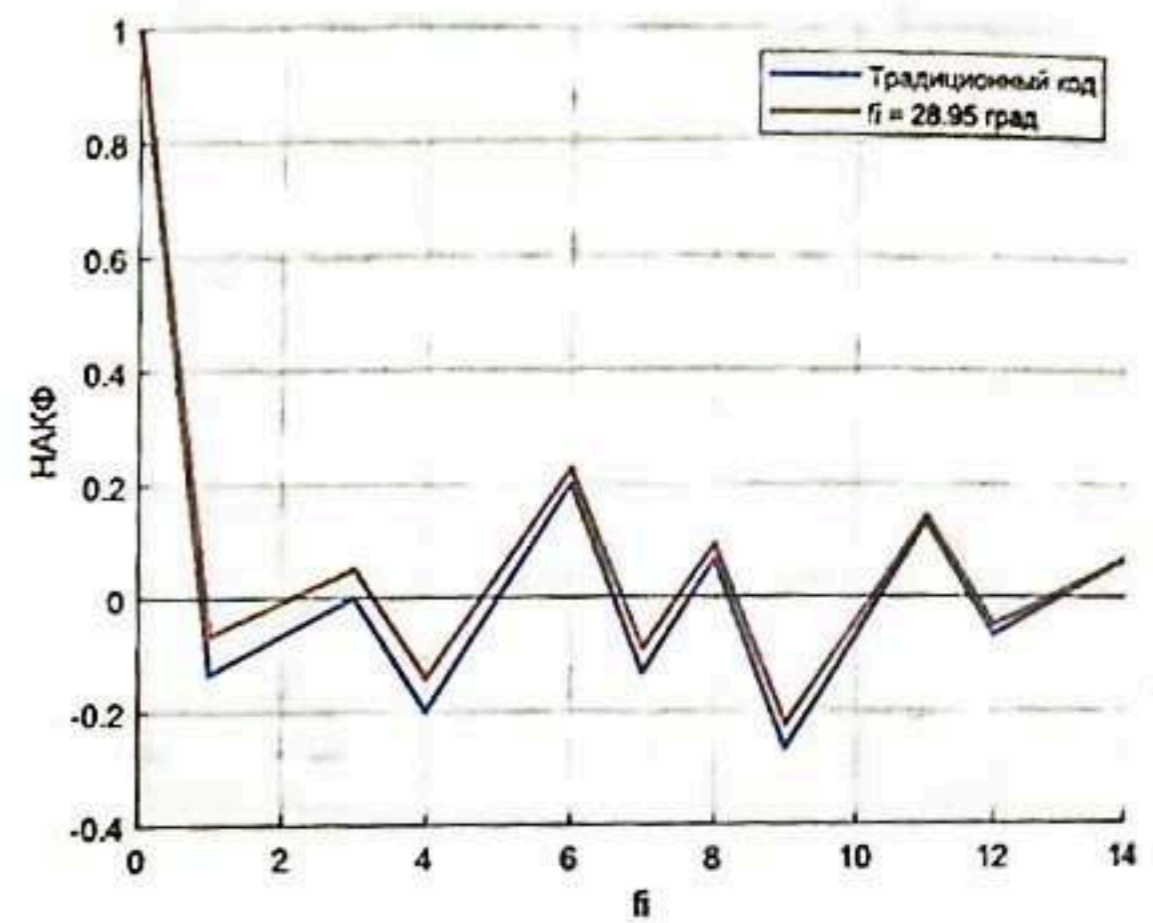


г)

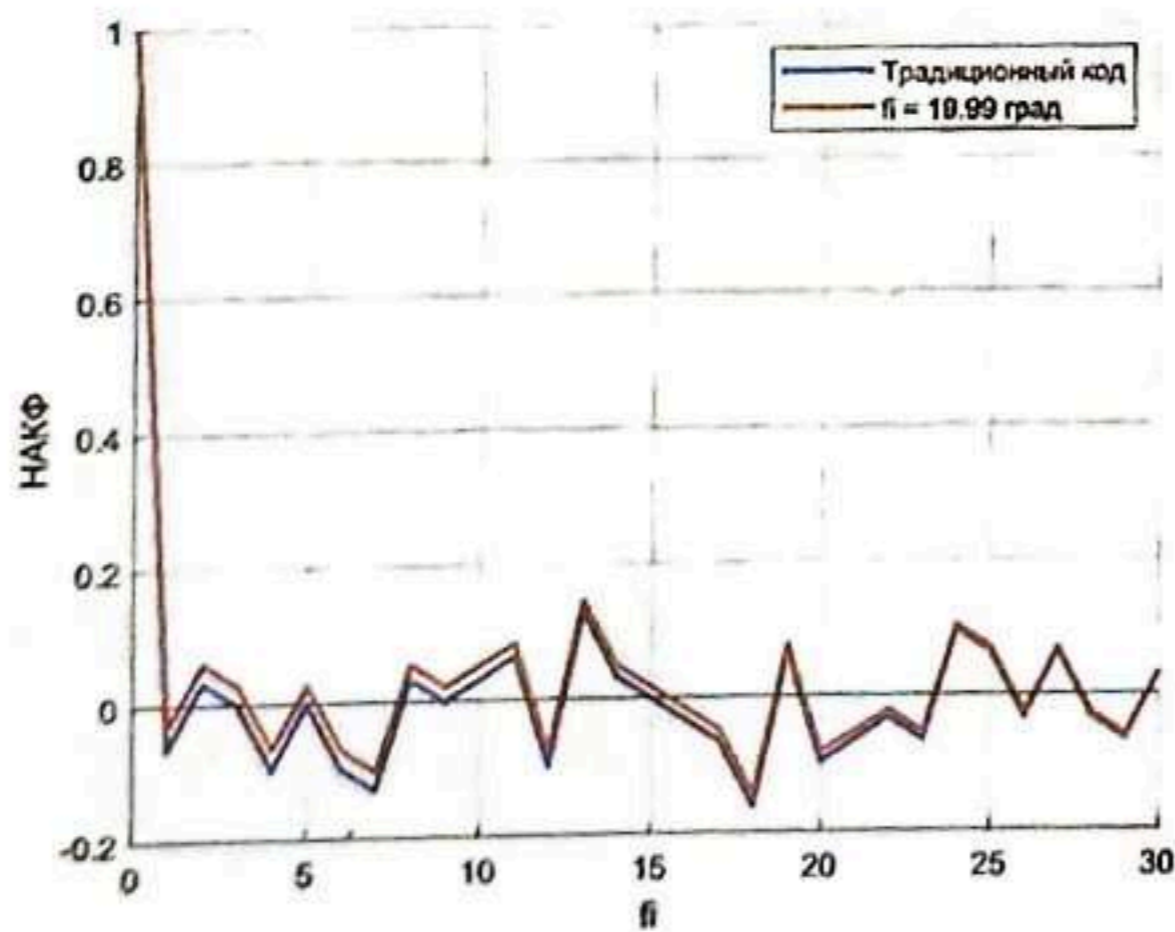
Рисунок 4 – Зависимость уровня БЛ НАКФ комплексной последовательности от параметра φ : а) последовательность №3; б) последовательность №4; в) последовательность №5; г) последовательность №6



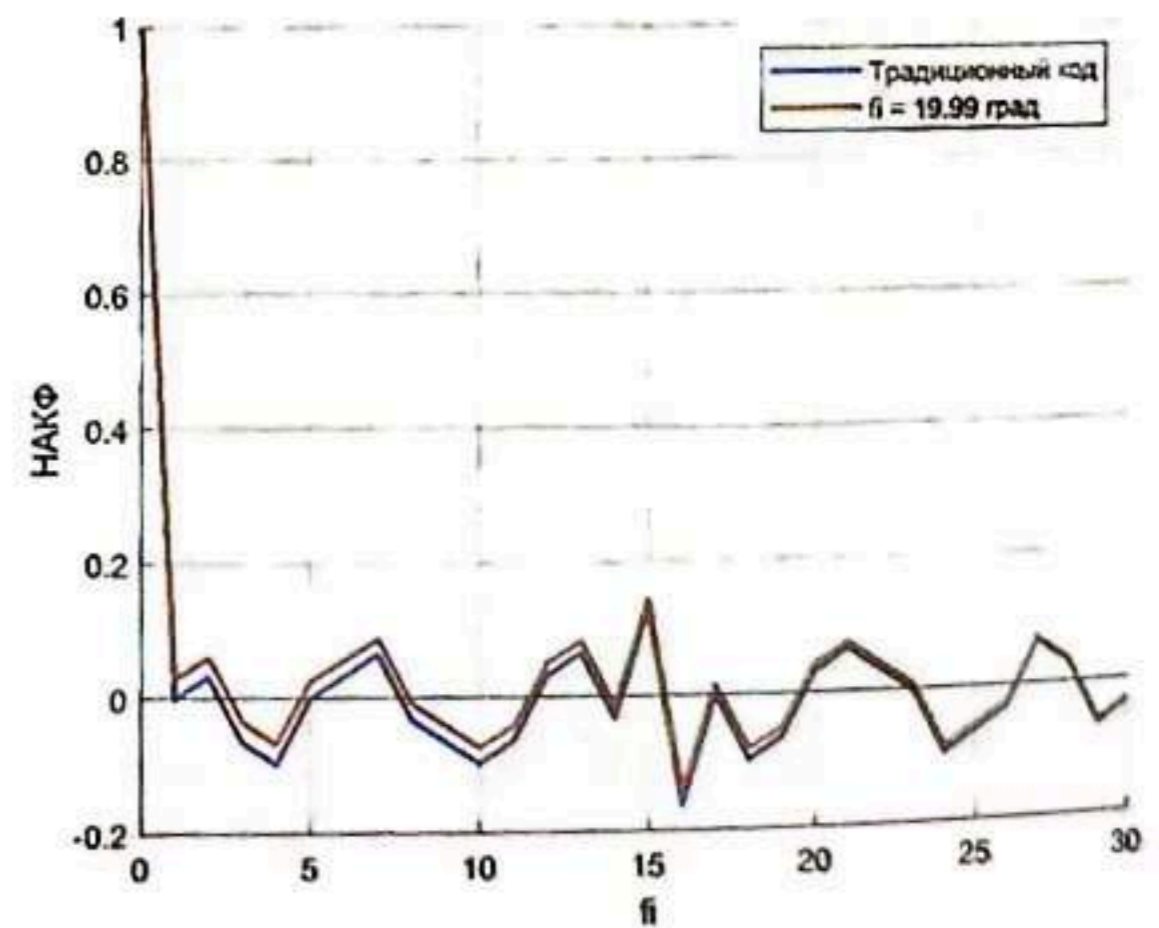
а)



б)

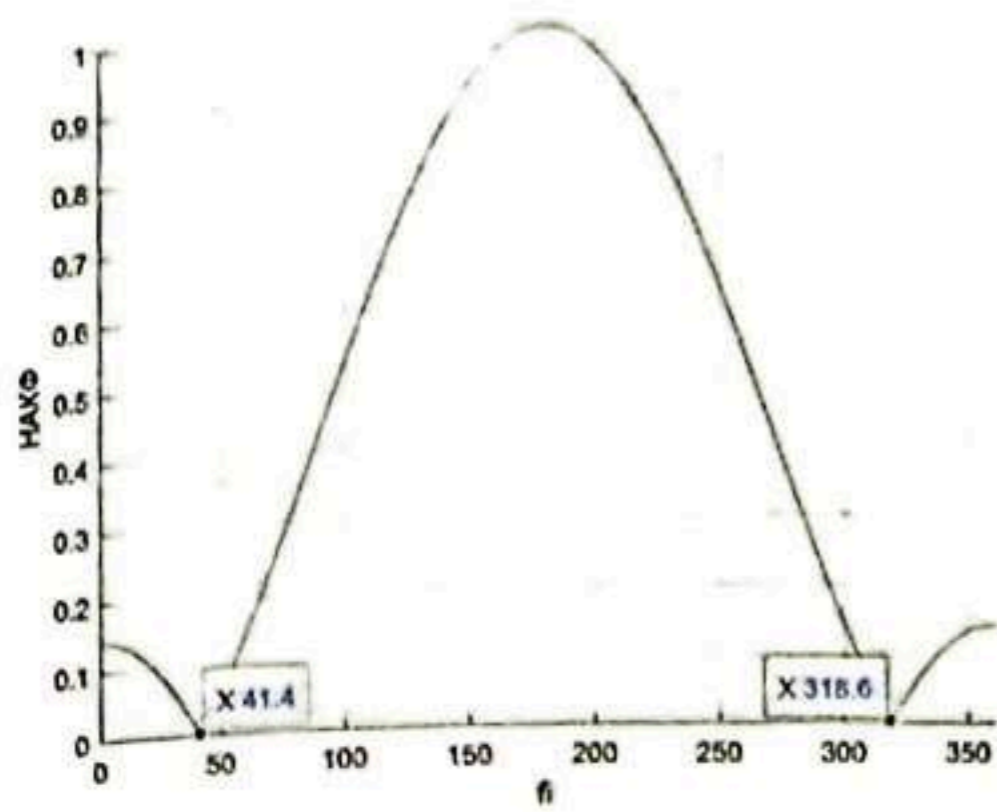


в)

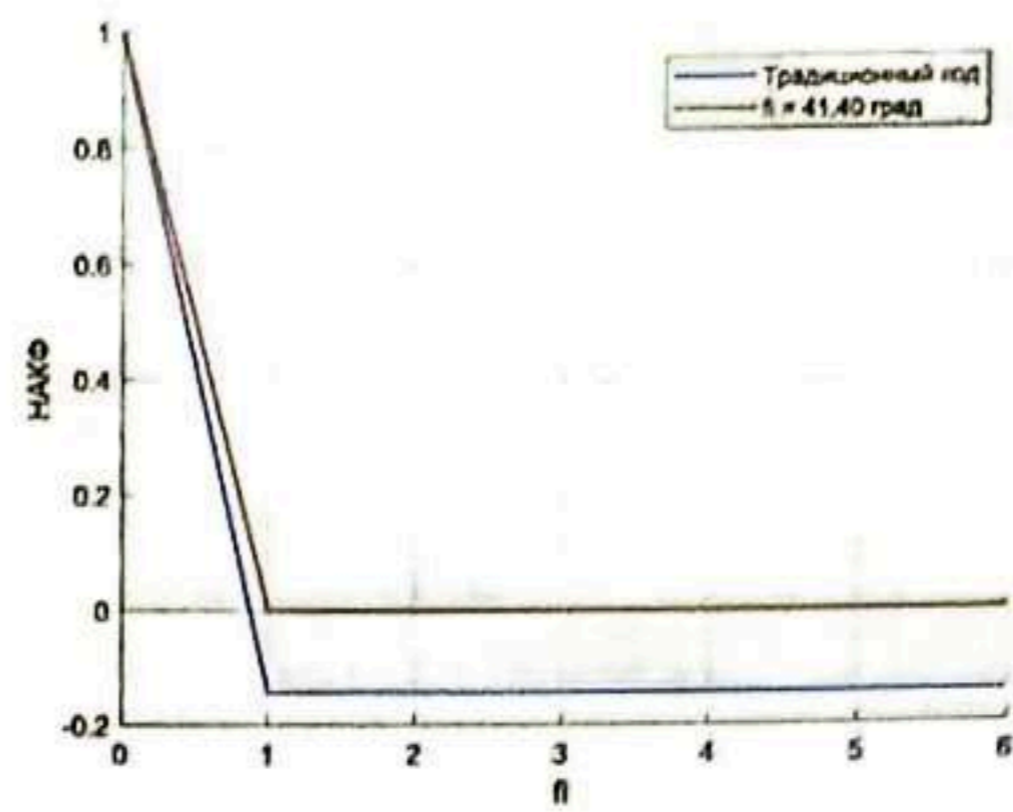


г)

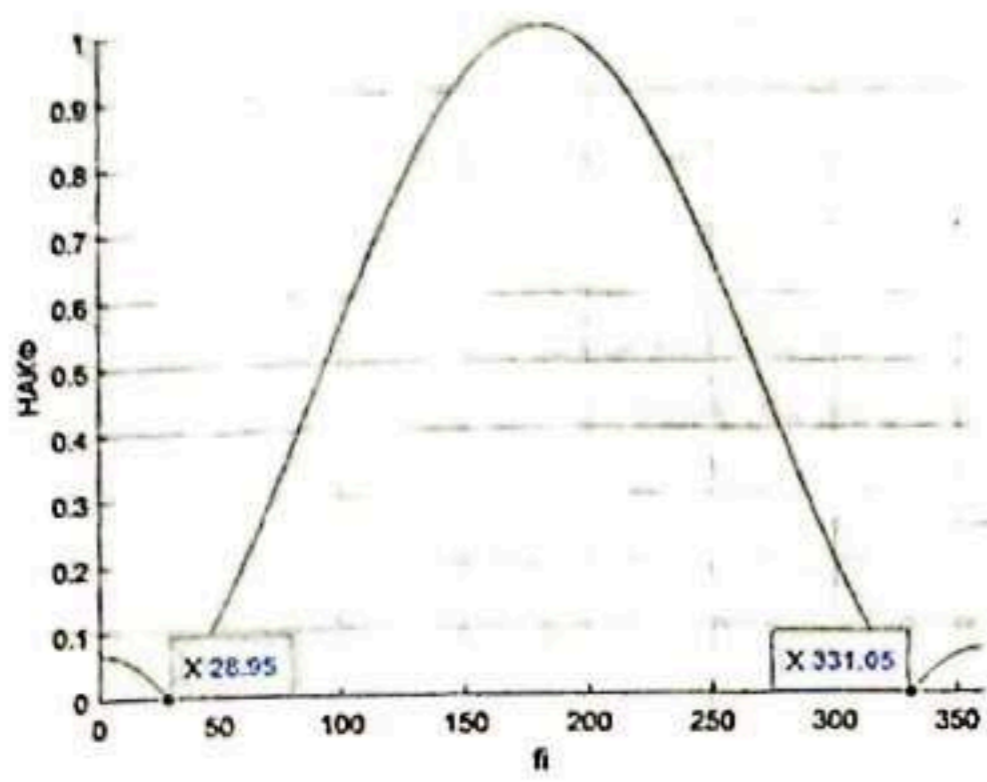
Рисунок 5 – НАКФ традиционной M-последовательности и комплексной последовательности на ее основе: а) последовательность №3; б) последовательность №4; в) последовательность №5; г) последовательность №6



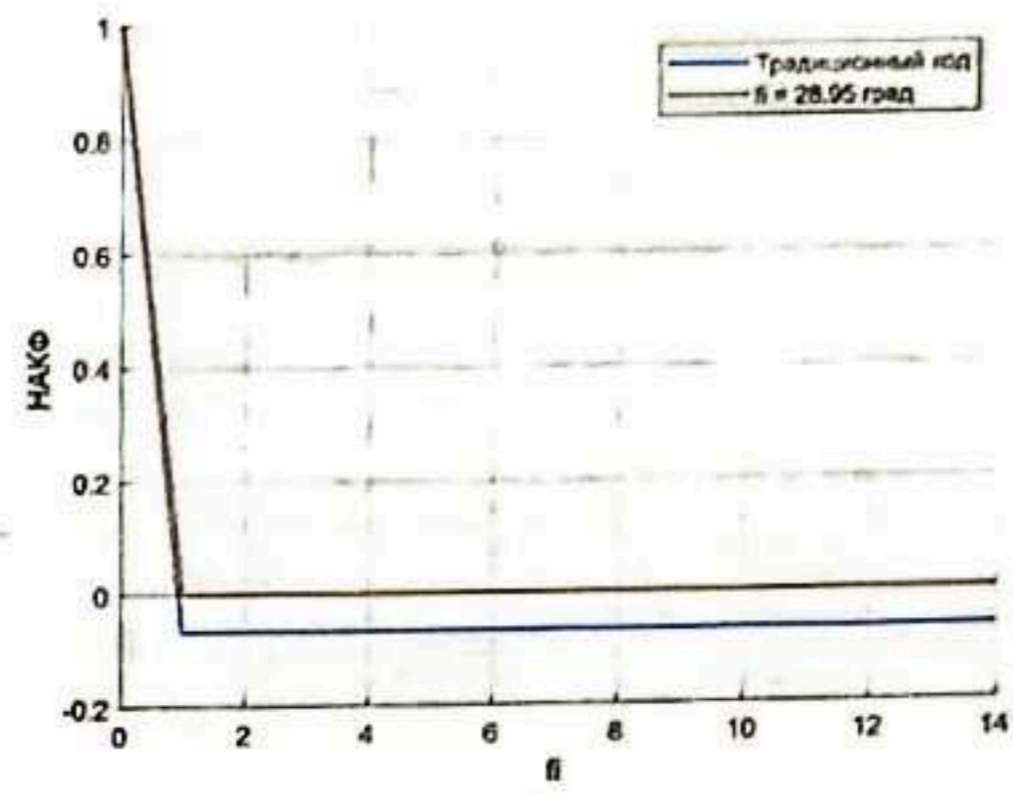
а)



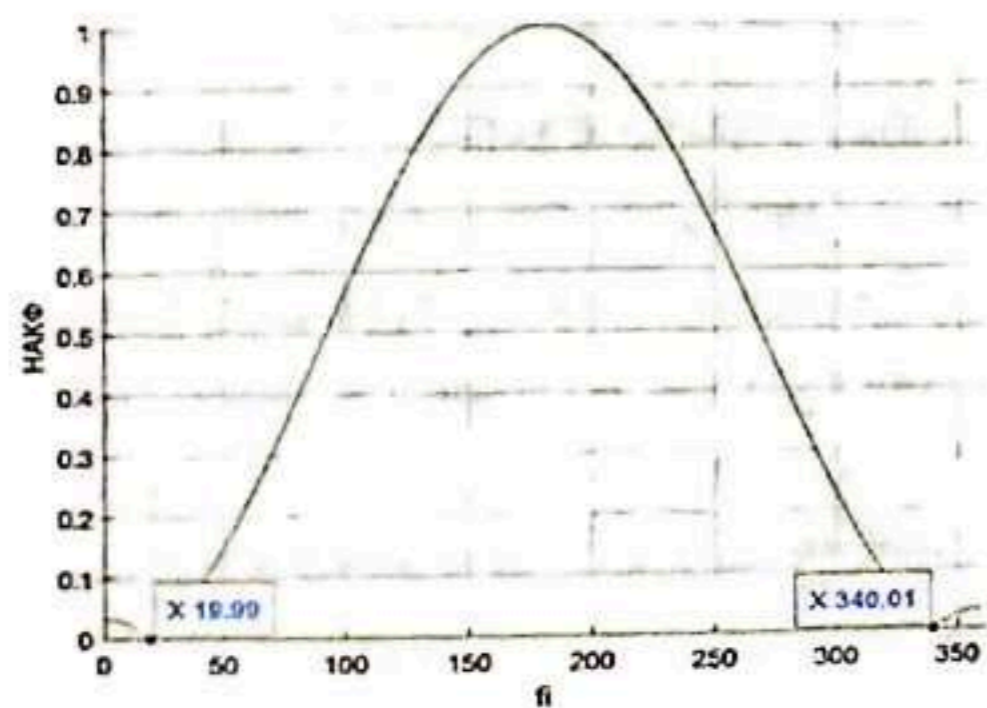
б)



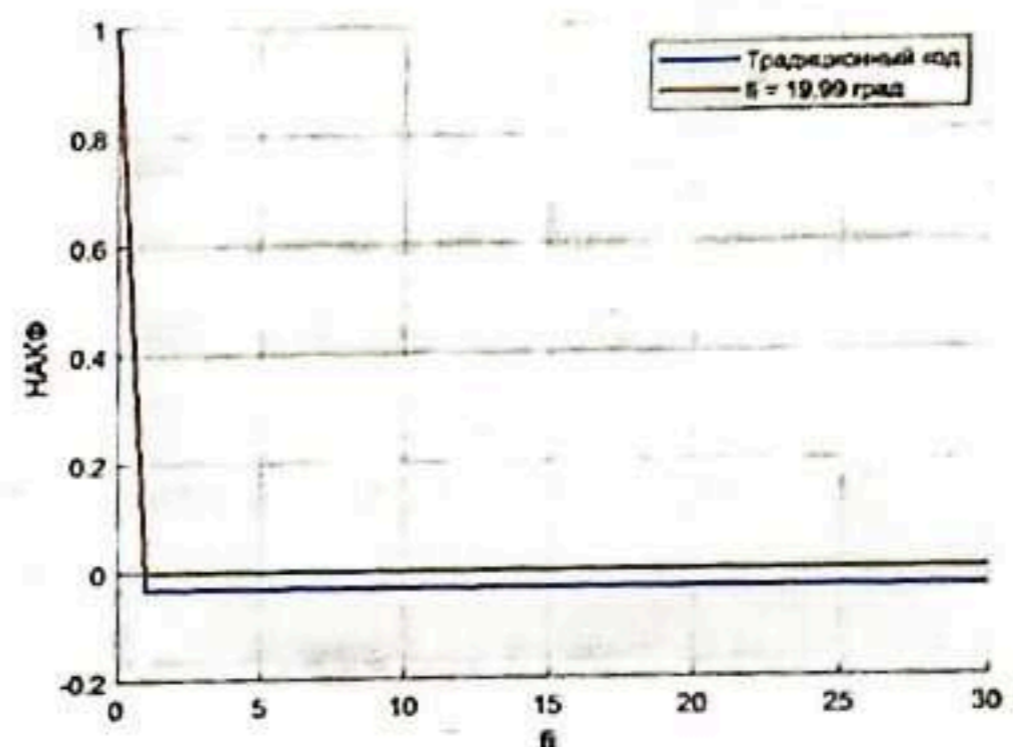
в)



г)



д)



е)

Рисунок 6 – Уровень БЛ периодической НАКФ а) Зависимость уровня БЛ периодической НАКФ комплексной последовательности длины $N = 7$ от параметра φ ; б) периодическая НАКФ традиционной M-последовательности длины $N = 7$ и комплексной последовательности на ее основе; в) Зависимость уровня БЛ периодической НАКФ комплексной последовательности длины $N = 15$ от параметра φ ; г) периодическая НАКФ традиционной M-последовательности длины $N = 15$ и комплексной последовательности на ее основе; д) Зависимость уровня БЛ периодической НАКФ комплексной последовательности длины $N = 31$ от параметра φ ; е) периодическая НАКФ традиционной M-последовательности длины $N = 31$ и комплексной последовательности на ее основе

Как видно из рисунка 6, для периодических и аperiodических НАКФ новых комплексных последовательностей одной длины оптимальные значения параметра φ одинаковы. Известно, что $\exp(\varphi_1 i) = \exp((360^\circ - \varphi_1) i)$, φ_2 можно представить как $-\varphi_1$. В

В таблице 5 приведен сравнительный анализ значений уровней БЛ НАКФ традиционных М-последовательностей и новых комплексных последовательностей, где отрицательный элемент «-1» был заменен на комплексное значение « $-\exp(\phi i)$ ».

Таблица 5 – Уровень БЛ НАКФ новых комплексных последовательностей

N	Максимальный уровень БЛ НАКФ последовательности		Разница между уровнями
	Традиционной М-последовательности	Новой комплексной последовательности	
7	0.2857	0.1786	0.1071
	0.2857	0.1429	0.1428
15	0.2000	0.1583	0.0417
	0.2667	0.2251	0.0416
31	0.1613	0.1437	0.0176
	0.1613	0.1418	0.0195
63	0.1429	0.1320	0.0109
127	0.1102	0.1043	0.0059
255	0.0588	0.0562	0.0026
511	0.0431	0.0419	0.0012

Анализ численных результатов таблицы 5 показывает, что поиск комплексных значений для новых последовательностей позволяет модифицировать традиционную М-последовательность, заменяя отрицательный элемент «-1» на найденное комплексное значение. Это приводит к снижению уровня БЛ НАКФ по сравнению с традиционными представлениями кода.

Например, максимальное уменьшение уровня боковых лепестков для НАКФ достигается у последовательностей длиной $N = 7$ и равно 0.1071 и 0.1428 для полиномов $x^3 + x^2 + 1$ и $x^3 + x + 1$ соответственно. Увеличение длины последовательности приводит к уменьшению уровня БЛ НАКФ до значений, близких к нулю, что улучшает обнаружение сигнала на фоне шумов [10].

3 Фазовая модуляция

В современных малогабаритных бортовых радиолокационных системах (МБРЛС) является важным улучшение разрешающей способности по дальности [11-13]. Для этого используются сложные зондирующие сигналы с широким спектром, что повышает точность и достоверность оценки дальности до объектов.

Важным также является выбор модуляции сигнала и его спектральных характеристик, что влияет на разрешающую способность по дальности при обнаружении наземных объектов.

Далее следует рассмотреть метод генерации и анализа корреляционных свойств сигналов, модулированных по фазе новыми комплексными последовательностями. Полученные ранее значения начальной фазы ϕ новых последовательностей позволяют сгенерировать сигналы, модулированные по фазе и обладающие более низкими уровнями БЛ [14] по сравнению с традиционными. Пример такого сигнала, модулированного последовательностью с длиной $N = 7$, показан на рисунке 7.

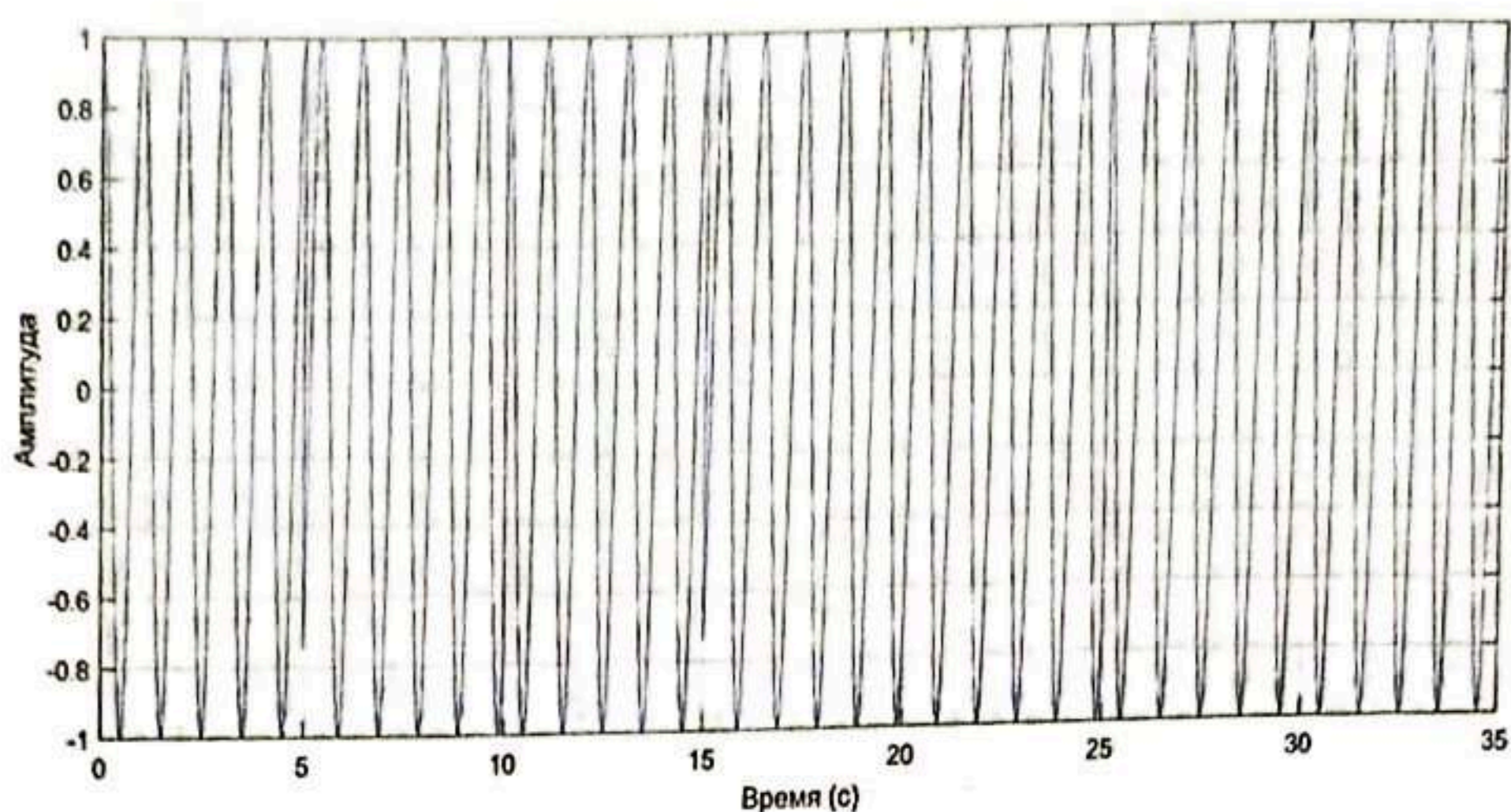


Рисунок 7 – Модулированный по фазе сигнал комплексной последовательностью

На рисунках 8-10 представлены НАКФ комплексных последовательностей и сжатых сигналов, построенных на их основе.

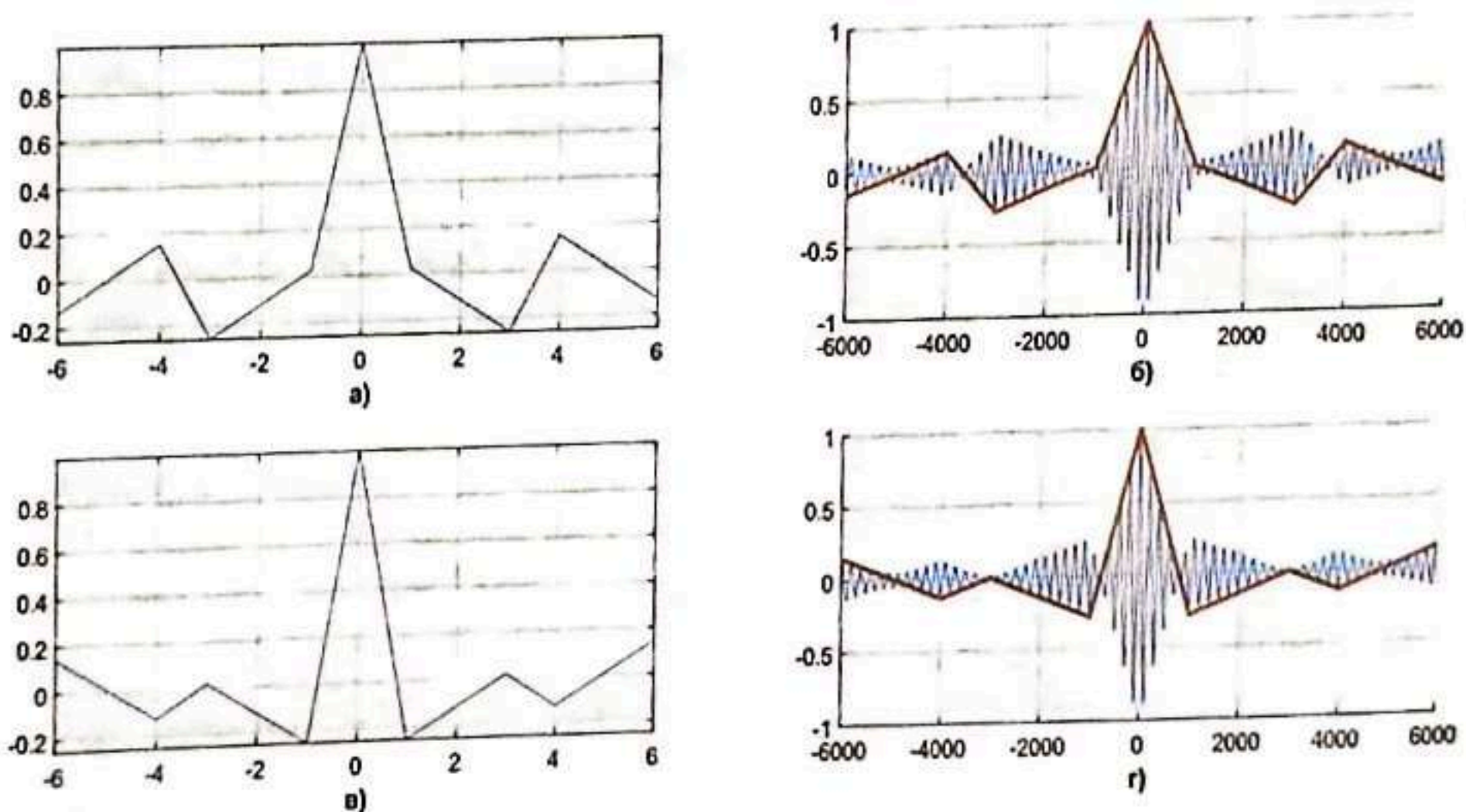


Рисунок 8 – НАКФ комплексных последовательностей и фазомодулированных сигналов длиной $N = 7$: а) последовательность №1; б) сигнал, фазомодулированный комплексной последовательностью №1; в) последовательность №2; г) сигнал, фазомодулированный комплексной последовательностью №2

Проанализировав графики, изображенные на рисунках 8-10, можно сделать вывод, что НАКФ комплексных последовательностей и сжатые сигналы соответствуют друг другу по уровню БЛ, что указывает на то, что сигналы были сформированы корректно.

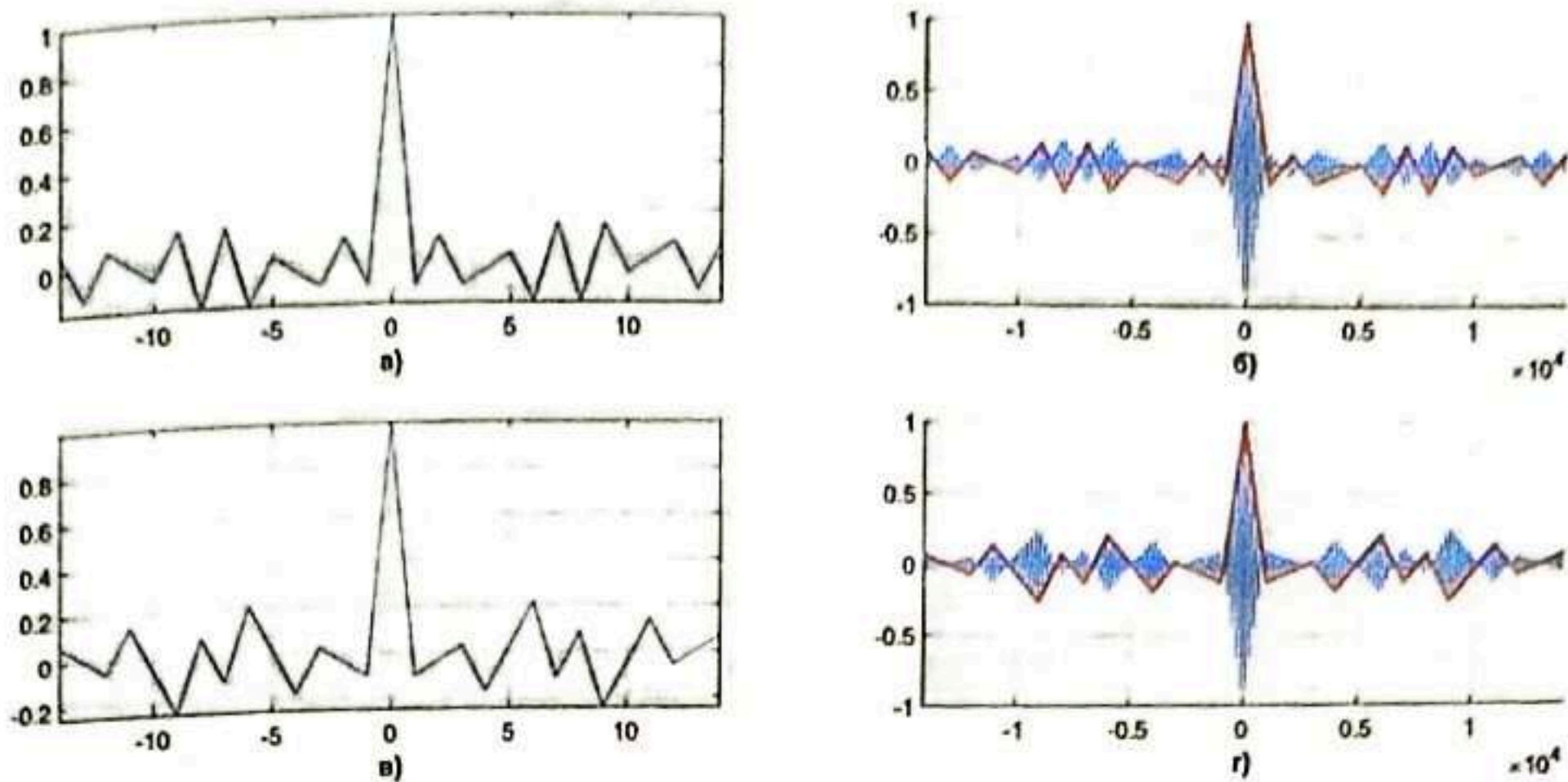


Рисунок 9 – НАКФ комплексных последовательностей и фазомодулированных сигналов длиной $N = 15$: а) последовательность №3; б) сигнал, фазомодулированный последовательностью №3; в) последовательность №4; г) сигнал, фазомодулированный последовательностью №4

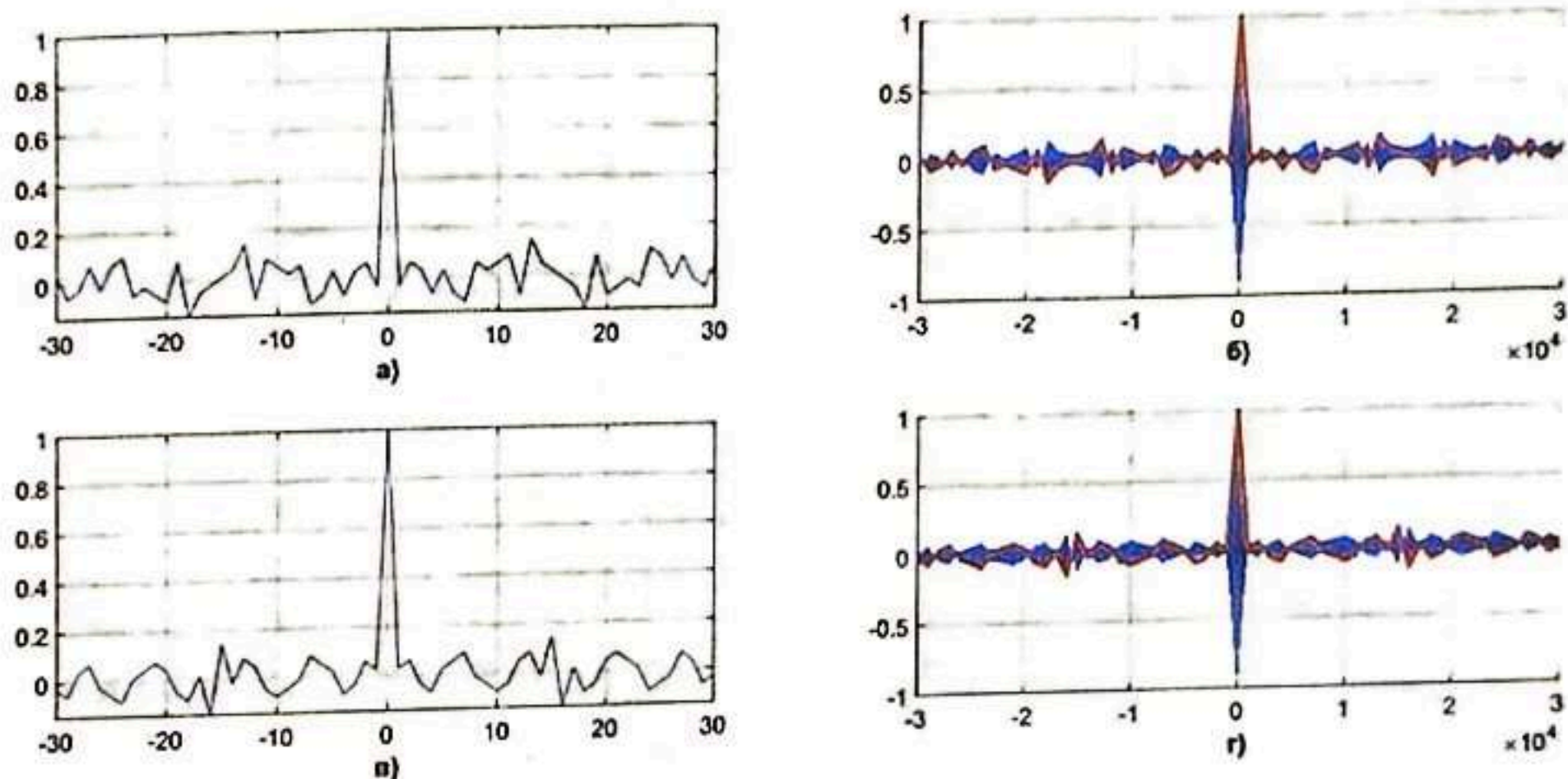


Рисунок 10 – НАКФ комплексных последовательностей и фазомодулированных сигналов длиной $N = 31$: а) последовательность №5; б) сигнал, фазомодулированный последовательностью №5; в) последовательность №6; г) сигнал, фазомодулированный последовательностью №6

4 Широтно-импульсная модуляция

Помимо фазовой модуляции сигналов, обеспечивающей понижение уровня БЛ после сжатия, внимание уделяется также широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [15-17], применение которой, способствует уменьшению ширины главного лепестка НАКФ. Это позволяет повысить точность определения расстояния до объектов, позволяя системе более точно определять координаты по дальности физических наземных объектов (ФНО) при различных условиях контроля за ними.

Как известно, ШИМ зависит от значений скважности импульса S или от обратного ей коэффициента заполнения D [18]. Здесь будут рассматриваться изменения комплексных последовательностей в зависимости от коэффициента заполнения, ха-

рактически выражением

$$D = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{S}, \quad (1)$$

где T – период импульсов,

τ – длительность импульса.

Далее будет рассмотрено несколько вариантов ШИМ-сигналов с разными коэффициентами заполнения D : 100%, 50% и 25% (1, 0.5 и 0.25 соответственно). D определяет отношение времени, в течение которого сигнал активен, к общей длительности импульса. При коэффициенте заполнения 100% сигнал активен на протяжении всего времени импульса, что обеспечивает максимальную мощность передаваемого сигнала. При снижении коэффициента заполнения до 50% и далее до 25% длина элементарного импульса уменьшается, что приводит к изменению ширины элементарного импульса сигнала. Эти изменения отображены на рисунке 11, где видно, как изменение D влияет на длительность элементарных импульсов в традиционных М-последовательностях.

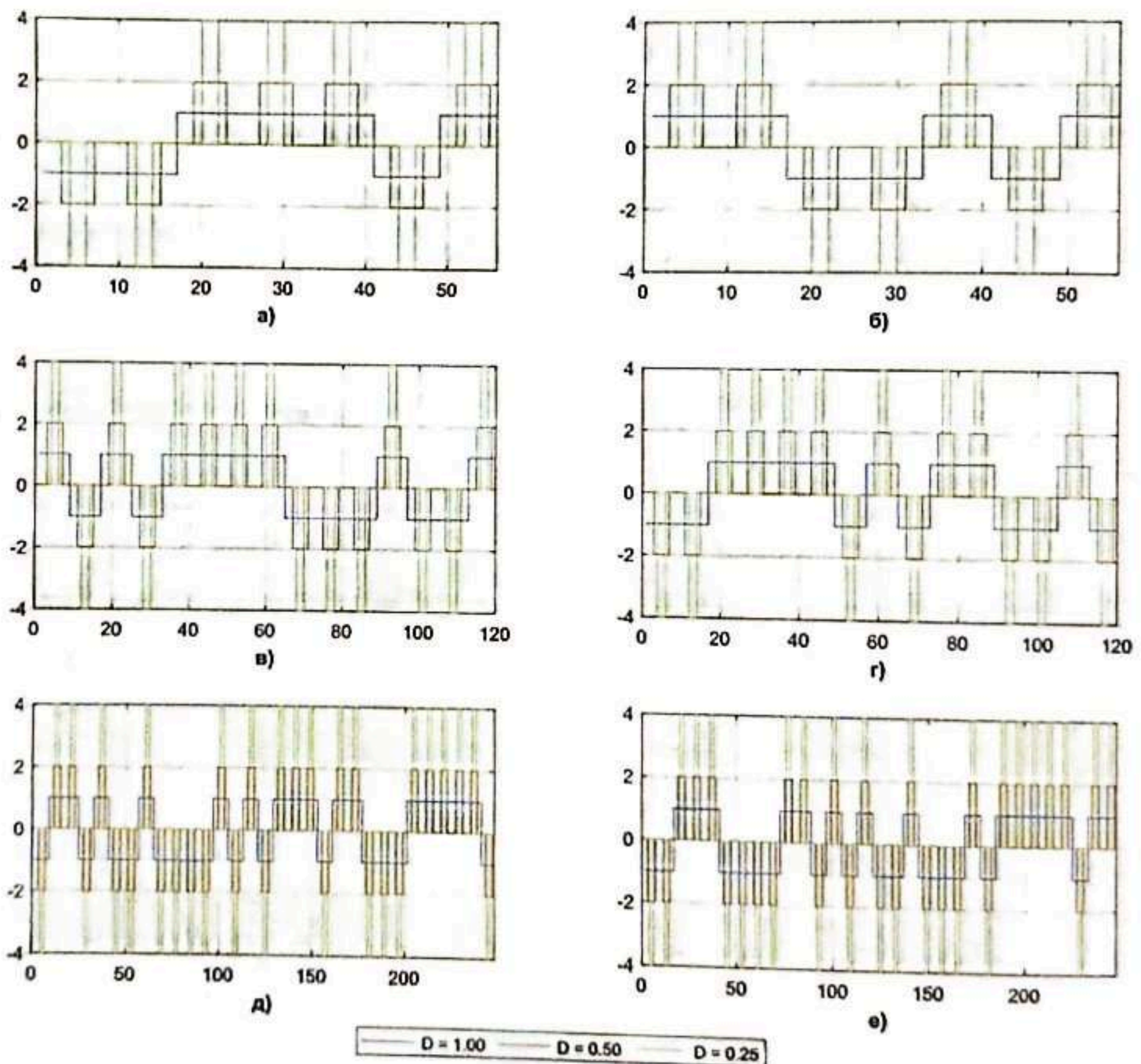


Рисунок 11 – Форма импульсных последовательностей в зависимости от D : а) М-последовательность №1; б) М-последовательность №2; в) М-последовательность №3; г) М-последовательность №4; д) М-последовательность №5; е) М-последовательность №6

Как видно из графиков, при уменьшении D длительность элементарного импульса уменьшается прямо пропорционально, что ведет к более коротким сигналам. Изменения НАКФ, вызванные изменениями D , влияют на способность системы обнаруживать ФНО в условиях наличия шума. Поэтому анализ этих последовательностей является важным шагом при разработке радиолокационных и радионавигационных систем. На рисунке 12 показаны НАКФ импульсных последовательностей, на которых видно, как именно изменение D влияет на ширину главного и боковых лепестков.

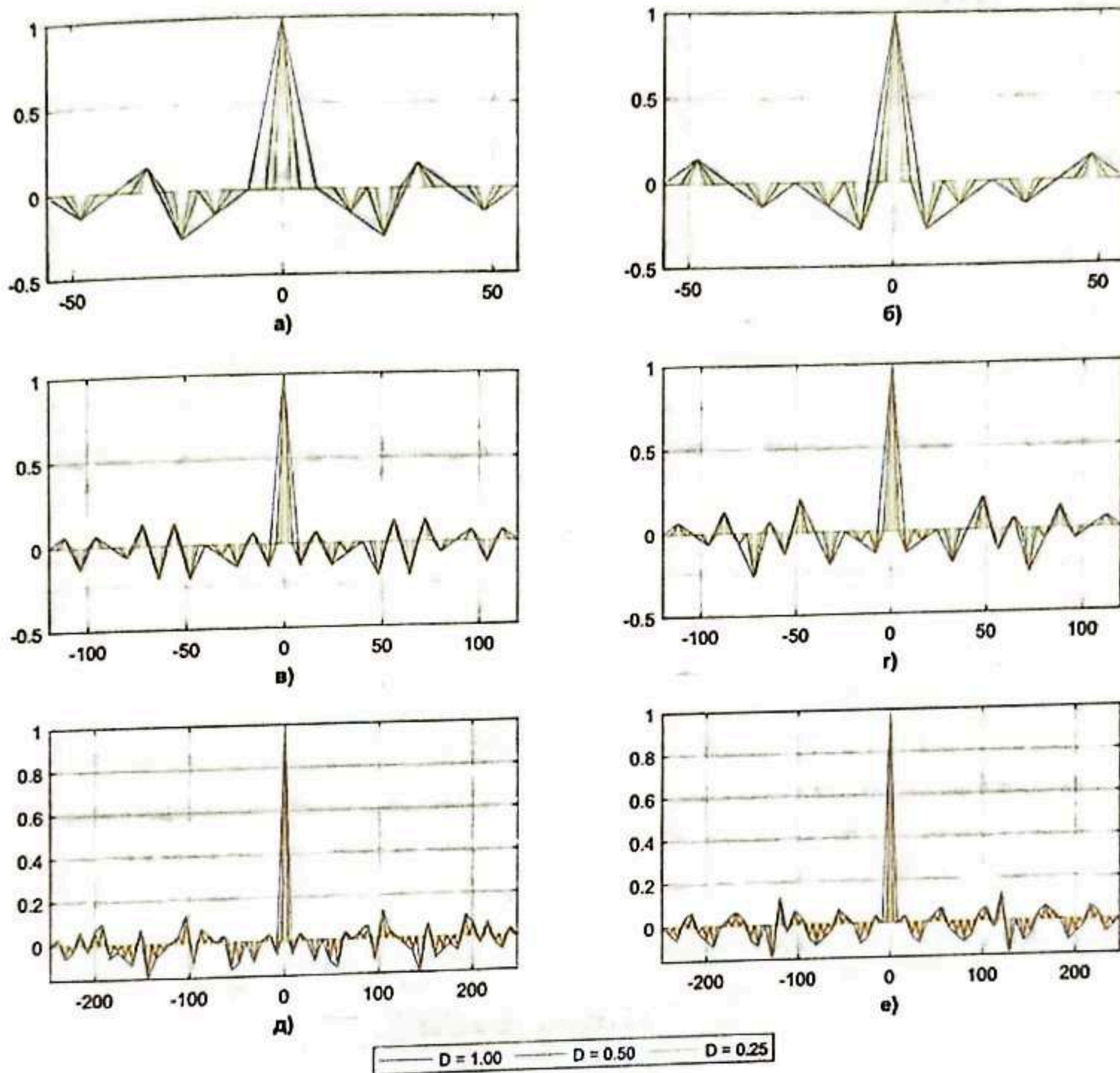


Рисунок 12 – НАКФ зависимых от D импульсных последовательностей: а) М-последовательность №1; б) М-последовательность №2; в) М-последовательность №3; г) М-последовательность №4; д) М-последовательность №5; е) М-последовательность №6

Таким образом, в ходе исследования была успешно реализована ШИМ традиционных М-последовательностей.

5 Фазовая и широтно-импульсная модуляция

При использовании ФМ-сигнала, полученного из комплексной последовательности, были получены низкие уровни БЛ НАКФ, а при использовании ШИМ-сигналов, основанных на традиционных М-последовательностях, были получены более узкие главный и боковые лепестки НАКФ. Таким образом, следует применять одновременно ШИМ и ФМ, чтобы обеспечить получение одновременно низких и узких

лепестков НАКФ для более достоверных и высокоточных измерений координат объектов.

На рисунке 13 изображены НАКФ сигналов, модулированных новыми комплексными последовательностями как по фазе, так и по ширине с амплитудой. Серой пунктирной линией отображен верхний предел, равный 0.71 (что соответствует -3дБ), на уровне которого происходит обнаружение главного лепестка НАКФ.

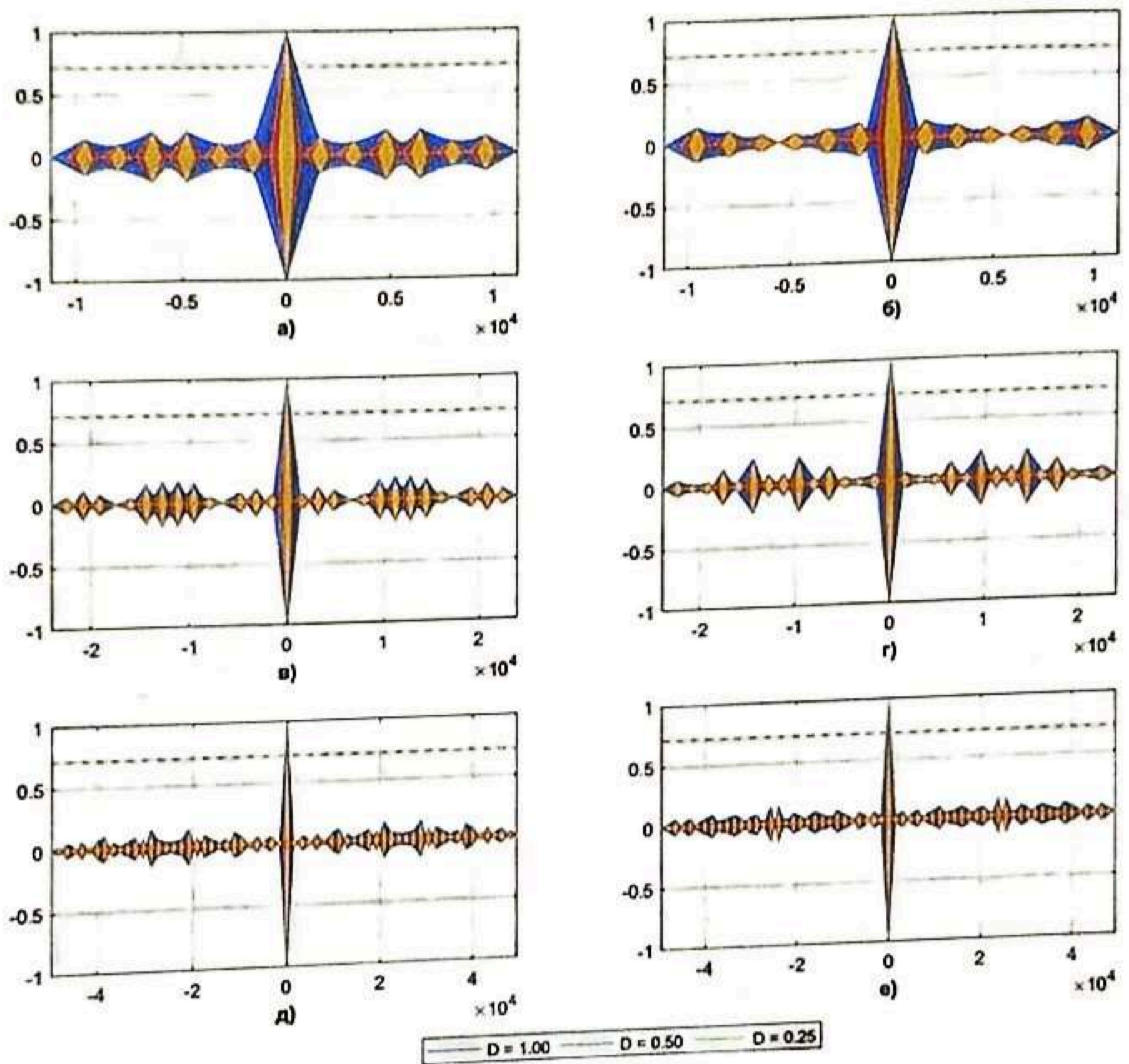


Рисунок 13 – НАКФ модулированных сигналов: а) последовательность №1; б) последовательность №2; в) последовательность №3; г) последовательность №4; д) последовательность №5; е) последовательность №6

На рисунке 14 более наглядно показаны точки пересечения верхнего предела на уровне 0.71 НАКФ комплексных последовательностей.

Компьютерное моделирование показало, что уменьшение D приводит к значительному сужению пиков НАКФ, что улучшает разрешение системы и позволяет более точно разделять сигналы во времени. На рисунках 13 и 14 видно значительное уменьшение ширины пиков НАКФ, что свидетельствует об улучшении характеристик сжатого сигнала. Так, при скважности $D = 1$ ширина главного лепестка НАКФ равна 100%, а при $D = 0.25$ – 20%. Уменьшение ширины главного пика особенно важно, так как повышает точность определения дальности до ФНО.

Более узкий главный пик АКФ способствует лучшему разделению полезных

сигналов и фонового шума, что важно в сложных радиолокационных условиях. Высокая точность обнаружения сигналов позволяет эффективнее идентифицировать и классифицировать ФНО, расширяя возможности радиолокационных технологий в таких областях, как контроль зон ЧС и мониторинг окружающей среды [19, 20].

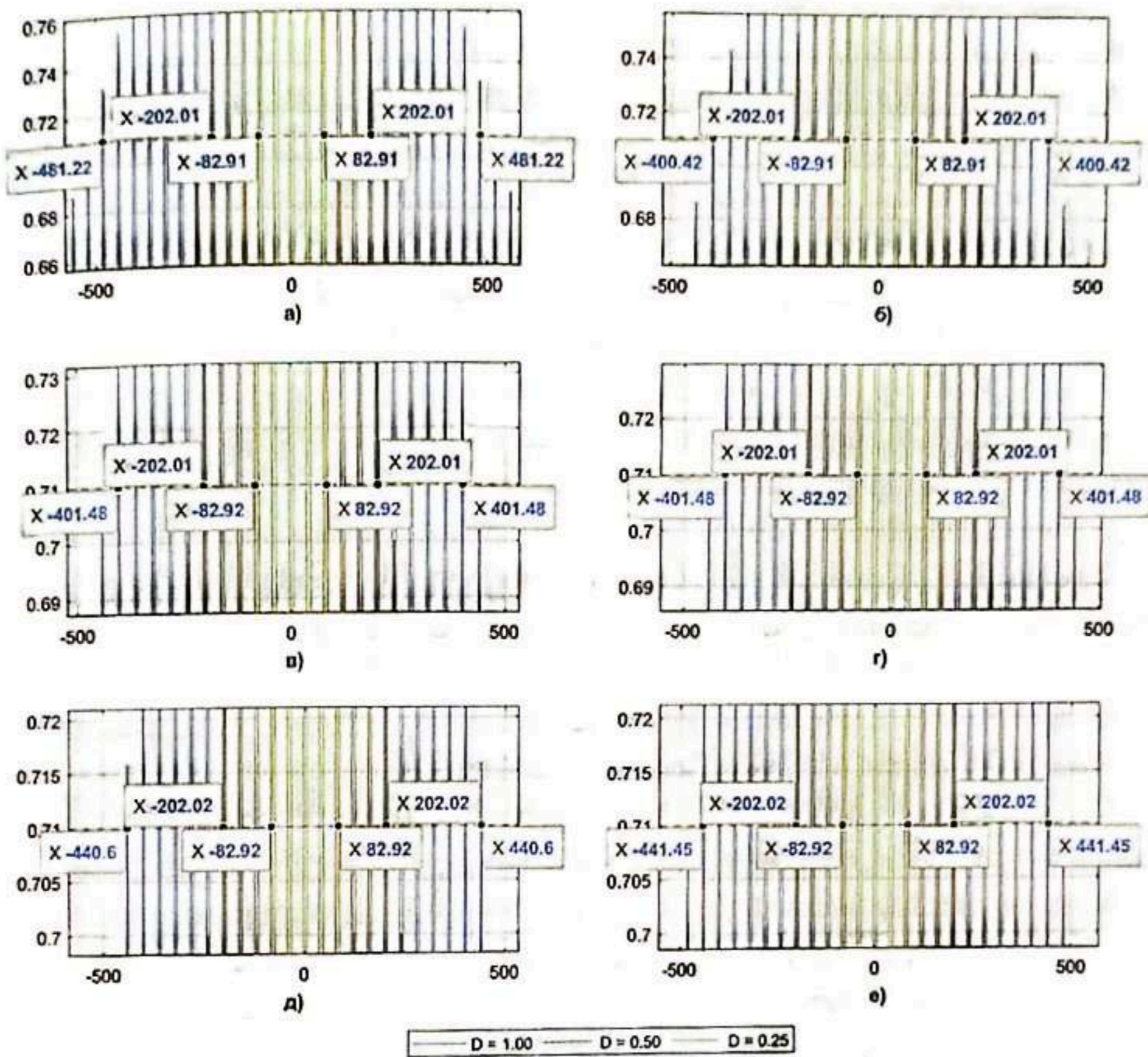


Рисунок 14 – Точки пересечения НАКФ модулированных сигналов и прямой в -3дБ : а) последовательность №1; б) последовательность №2; в) последовательность №3; г) последовательность №4; д) последовательность №5; е) последовательность №6

Заключение

В результате проведенного исследования была выполнена оценка корреляционных свойств новых комплексных последовательностей. Разработан алгоритм, основанный на замене традиционного алфавита M-последовательностей на комплексный несимметричный, что позволило значительно снизить уровень БЛ НАКФ. Исследованы фазовая и широтно-импульсная модуляции сигналов на основе комплексных последовательностей, что позволило получить сигналы с улучшенными корреляционными свойствами, включая уменьшение толщины главного лепестка и уровней БЛ НАКФ. Полученные результаты подтверждают перспективность применения новых комплексных последовательностей для повышения эффективности радиолокационных и радионавигационных систем.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на поиск но-

вых комплексных последовательностей с одновременной заменой традиционных элементов М-последовательности, как отрицательных, так и положительных на их представление в комплексном виде.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

Литература

1 Панкратов Д.Ю., Горовенко А.В. Использование пространственно-временного мультиплексирования с целью повышения защищенности информации в мобильных сетях радиосвязи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14, № 1. С. 49-54.

2 Когновицкий О.С., Кукунин Д.С. Применение двойственного базиса для обработки М-последовательностей над полем с двойным расширением // Электросвязь. 2023. № 10. С. 34-42.

3 Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Радиолокация с голографическим кодированием зондирующего сигнала // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 3

4 Ипанов Р.Н., Комаров А.А. Применение зондирующих ФКМ-сигналов с нулевой зоной автокорреляции для улучшения качества измерений в РСА // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 1.

5 Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и положения. Москва: Техносфера, 2007. 487 с.

6 Nenashev V. A.; Nenashev, S. A. Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars. Sensors 2023, 23, 6835.

7 Межетов М.А., Васин А.Д. Особенности применения широкополосных сигналов в системах связи и навигации // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: материалы XIII Международной научно-практической конференции, Иркутск, 10–11 октября 2024 года. Иркутск: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2024. С. 169-176.

8 Патент № 2709666 С1 РФ. Псевдослучайная кодовая шкала: № 2019103609: заявл. 08.02.2019: опубл. 19.12.2019 / А.А.Ожиганов, П.А.Прибыткин.

9 Захаров И.Д., Ожиганов А.А. Использование порождающих полиномов М-последовательностей при построении псевдослучайных кодовых шкал // Приборостроение. 2011. №6.

10 Чембарисова Р.И., Ненашев В.А. Контроль аномалий в структуре кодов на основе анализа выражений лепестков автокорреляционной функции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №12. С. 4-11.

11 Патент № 2703996 С2 РФ. Способ локации целей в передних зонах обзора бортовых радиолокационных станций двухпозиционной радиолокационной системы: № 2019108828: заявл. 26.03.2019: опубл. 23.10.2019 / Г.А.Коржавин, В.А.Ненашев, А.П.Шепета [и др.].

12 Махлин А.М., Ненашев В.А., Шепета А.П. Сравнительные характеристики квазиоптимальных цифровых обнаружителей сверхширокополосных сигналов // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных

системах: XXI международная молодежная конференция, Санкт-Петербург, 01–05 октября 2018 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. С. 257-264.

13 Sorokin A.V., Shepeta A.P., Nenashev V.A., Wattimena G.M. Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves // Information and Control Systems. 2019. No. 1(98). P. 48-56.

14 Ненашев В.А., Сеницын В.А., Страхов С.А. Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатие фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды IX общероссийской научно-практической конференции. В 2 томах, Санкт-Петербург, 16-18 ноября 2016 года. Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2017. С. 351-355

15 Ненашев В.А., Бестугин А.Р., Киршина И.А., Антохин Е.А. Формирование потока радиолокационных кадров в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78, № 3. С. 59-69.

16 Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars. Informationsno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 31-36.

17 Nenashev V.A., Nenashev S.A. Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars. Sensors. 2023; 23(15):6835.

18 Лосев Д.С. Гуляев А.В., Фокин Д.С. Стенд проверки датчиков контроля пламени // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 1(38). С. 75-80.

19 Ненашев С.А., Бестугин А.Р., Чембарисова Р.И., Киршина И.А., Ненашев В.А. Контроль толщины льда на основе применения сверхширокополосных сигнально-кодовых конструкций // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 6. С. 13-22.

20 Ненашев В.А., Сенцов А.А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. 191 с.

Ненашев Вадим Александрович – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: компьютерное моделирование, системы навигации и радиолокации, статистический анализ, широкополосные сигналы, модуляция радиолокационных сигналов.

E-mail: nenashev.va@yandex.ru, nenashev@guap.ru

Чембарисова Рената Ильдаровна – студентка кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: широкополосные сигналы, компьютерное моделирование, модуляция радиолокационных сигналов.

E-mail: renatachembarisova@yandex.ru

Почтовый адрес: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

PHASE AND PULSE-WIDTH MODULATION OF SIGNALS BY NEW COMPLEX SEQUENCES

In radar and radio navigation systems, signals modulated by the M-sequence are widely used due to their unique correlation properties. However, rather high levels of side lobes (SL) of the autocorrelation function (ACF) can negatively affect the correct operation of detection systems. Therefore, an urgent task is to search for new complex sequences with lower levels of SL of the normalized autocorrelation function (NACF), as well as the generation of signals modulated by them. The purpose of this study is to search for new complex sequences based on traditional M-sequences, for which the level of SL of the NACF is lower. This decrease in the levels of SL of the NACF is achieved by replacing the traditional symmetric alphabet consisting of positive and negative ones with an asymmetric one consisting of positive ones and a complex value in the structure of the M-sequence. In this study, it is necessary to analyze the nature of the change in the SL of the NACF and determine the complex values at which the levels of the SL of the NACF will be the lowest for new complex sequences. The study uses numerical methods for finding complex values of sequences. Computer experiments are carried out to estimate the levels of the SL of the NACF based on the obtained expressions describing the nature of the change in each SL of the NACF. In addition, phase modulation of the signal by the generated complex sequence is studied, as well as pulse-width modulation with variable amplitude and width of elementary pulses. Autocorrelation properties of the obtained signals modulated simultaneously in phase and width are analyzed. The obtained results include graphs of analytical dependencies describing the levels of the SL of the NACF, by which the search for the values of complex sequences is carried out, and changes in the width of the main lobe and SL of the NACF are analyzed depending on the duration of the elementary pulse at different duty cycles. Practical use of complex sequences and signals modulated by them confirmed the improvement of their correlation properties. Such an improvement can be used in small-sized airborne radar and radio navigation systems.

Keywords: M-sequence, complex sequence, autocorrelation function, side lobes, sequence analysis, phase modulation, pulse-width modulation, radar and radio navigation systems.

Nenashev Vadim Alexandrovich – Candidate of technical sciences, Associate Professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests: computer modeling, navigation and radar systems, statistical analysis, broadband signals, radar signal modulation.

Chembarisova Renata Ildarovna – student of the Department of Aerospace Computer and Software Systems, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests: broadband signals, computer modeling, radar signal modulation.