

# ДЛИТЕЛЬНОЕ НЕКОГЕРЕНТНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЦЕЛИ

С.В. Козлов, Ле Ван Кыонг

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), Минск, Беларусь

**Аннотация.** Приведены простые алгоритмы некогерентного накопления пачки импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазокодовой манипуляцией (ФКМ) при обнаружении высокоскоростной цели, движущейся с неизвестной скоростью. Алгоритмы основаны на анализе радиолокационного изображения, получаемого при согласованной фильтрации (СФ) каждого ЛЧМ-импульса без учета радиальной скорости цели и совокупности радиолокационных изображений при согласованной фильтрации каждого ФКМ-импульса при многоканальной обработке с учетом радиальной скорости цели. Проведено математическое моделирование и получены характеристики обнаружения цели.

**Ключевые слова:** длительное некогерентное накопление, высокоскоростная цель, скорость и ускорение, радиолокационное изображение, согласованная фильтрация.

## LONG NONCOHERENT INTEGRATION OF THE REFLECTED SIGNAL WHEN DETECTING HIGH-SPEED TARGETS

S.V. Kozlov, Le Van Cuong

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

**Abstract.** Simple algorithms for noncoherent integration of the pulse burst with linear frequency modulation (LFM) and phase-shift keying (PSK) for detecting high-speed targets moving with unknown velocity are presented. The algorithms are based on the analysis of the radar image obtained by matched filtering (MF) of each LFM pulse without taking into account the radial velocity of the target and the totality of radar images with matched filtering of each PSK pulse during multichannel processing taking into account the radial velocity of the target. Mathematical modeling was carried out and the characteristics of target detection were obtained.

**Keywords:** long noncoherent integration, high-speed targets, velocity, acceleration, radar images, matched filtering.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным [1] является обеспечение обнаружения и точного сопровождения радиолокационных целей с малым значением эффективной площади рассеяния (ЭПР), находящихся на больших (сотни-тысячи км) дальностях и движущихся с большими (единицы км/с) скоростями. К числу таких целей относятся искусственные спутники Земли и гиперзвуковые летательные аппараты (ГЗЛА).

Обоснованию алгоритмов обнаружения высокоскоростных радиолокационных целей посвящено достаточно большое число работ [1-7]. В [2] приведен алгоритм обнаружения пачки импульсов, учитывающий набег фазы из-за доплеровского эффекта при постоянной радиальной скорости цели. В [3] предложена система многоканальной согласованной фильтрации пачки когерентных немодулированных импульсов с предварительным некогерентным накоплением. В [4] рассмотрены математические

модели сигналов, используемых в радиолокационных станциях обнаружения высокоскоростных целей на большой дальности. Обнаружению высокоскоростных целей, движущихся с неизвестными скоростями и ускорениями посвящены работы [5-7].

К основным проблемным вопросам обнаружения ГЗЛА следует отнести выбор зондирующих сигналов, определение моделей отраженных сигналов и разработка практически реализуемых алгоритмов обнаружения пачки отраженных сигналов. Отметим, что при реализации когерентного накопления число каналов приемного устройства при движении цели с постоянным ускорением может составить до нескольких сот тысяч [3-7], а при неизвестном ускорении цели – до нескольких миллионов. Практическая реализация таких приемных устройств оказывается затруднительной.

С позиций обеспечения помехоустойчивости и высокой разрешающей способности РЛС обнаружения ГЗЛА предпочтительным является использование сложных (ЛЧМ, ФКМ) импульсных сигналов большой  $T_0 = 0,1 \dots 1$  мс длительности с шириной спектра  $\Delta f_0 = 1 \dots 50$  МГц, а также режима быстрой (от импульса к импульсу или от пачки импульсов к пачке) перестройки несущей частоты. Коэффициент сжатия  $K_{сж}$  одиночных сигналов составит  $K_{сж} = \Delta f_0 T_0 = 10^2 \dots 5 \cdot 10^4$ .

Одним из возможных вариантов организации обработки заключается в использовании более простого некогерентного накопления отраженного сигнала. Обработку в этом случае можно разделить на два этапа. Первый этап заключается в реализации некогерентного накопления, в результате чего может быть грубо определена дальность и радиальная скорость цели (без ускорения). На втором этапе реализуется когерентное накопление при существенно меньшем числе каналов обработки.

Цель статьи – обоснование и анализ простых алгоритмов обнаружения высокоскоростных целей, основанных на некогерентном накоплении пачки

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Под элементом (пикселем)  $R_{i,m}$  радиолокационного изображения будем понимать квадрат модуля комплексной амплитуды на выходе согласованного фильтра одиночного импульса для  $i$ -го импульса пачки в моменты времени  $t_m = iT_r + t_{оп} + m / F_s$ ,  $i = \overline{0, I-1}$ , где  $I$  - число импульсов в пачке;  $t_{оп}$  - общий для всех периодов повторения опорный момент времени;  $T_r$  - период повторения импульсов пачки;  $F_s$  - частота дискретизации;

Для получение РЛИ используем согласованную фильтрацию. Для сигналов большой длительности СФ удобно выполнять путем выполнения БПФ над участками принимаемой реализации, умножения полученных спектральных отсчетов на комплексную частотную характеристику СФ и обратного БПФ.

### А. ЛИНЕЙНОЧАСТОТНОМОДУЛИРОВАННЫЙ ИМПУЛЬС

На рис. 1 приведены РЛИ при большом, среднем и малом отношении сигнал/шум (ОСШ) по каждому импульсу  $q_0^2 = 2E / N_0 = 20, 10$  и  $0$  дБ, соответственно при радиальной скорости цели  $2$  км/с и  $4$  км/с.

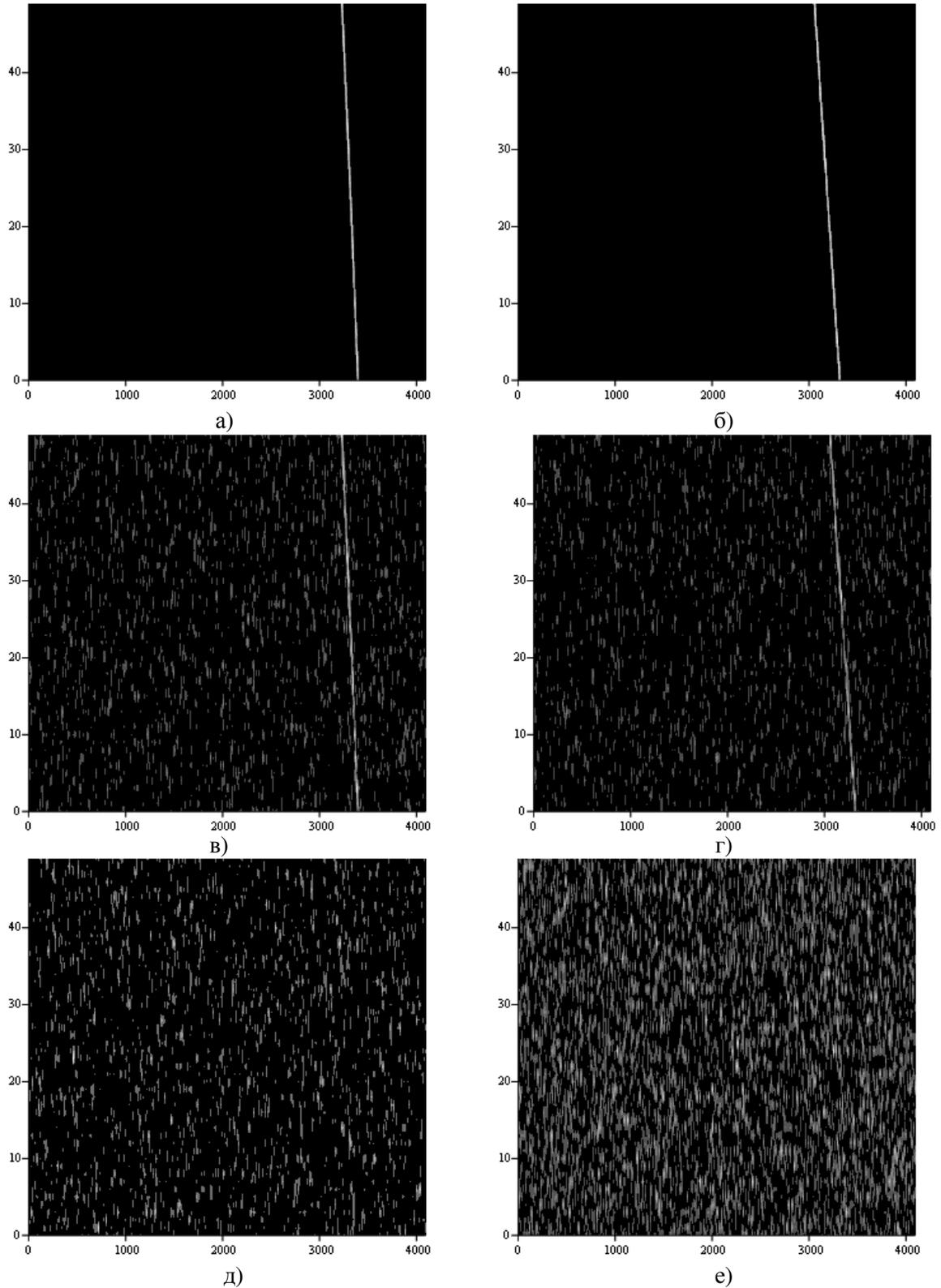


Рис. 1. Вид РЛИ при скорости цели  $2$  км/с (а, в, д) и  $4$  км/с (б, г, е) и отношении сигнал/шум по одиночному сигналу  $20$  дБ (а, б),  $10$  дБ (в, г) и  $0$  дБ (д, е), ЛЧМ-сигнал

Горизонтальная ось РЛИ соответствует отсчетам по дальности на выходе согласованного фильтра, вертикальная – периодам повторения импульсов. При большом ОСШ по одиночному сигналу на РЛИ имеется четко выраженная линия, начало которой на оси временных задержек соответствует дальности до цели со смещением на величину, определяемую радиальной скоростью цели и знаком внутриимпульсной частотной модуляции. Угол наклона линии определяется расстоянием, проходимым за время радиолокационного наблюдения, то есть соответствует радиальной скорости цели.

Если цель имеет постоянное радиальное ускорение  $a$ , то линия преобразуется в параболу, однако при имеющих место на практике значениях  $|a| < 15g$ , где  $g$  - ускорение свободного падения и длительности наблюдения  $T_n = T_r I < 0,5 \dots 1,0$  с визуально указанный факт не определяется.

При малых ОСШ линия визуально не обнаруживается, и для обнаружения цели при некогерентном накоплении необходимо использовать соответствующую обработку. Под термином «обнаружение цели при некогерентном накоплении» далее будем понимать визуальное или алгоритмическое принятие решения о наличии линии на РЛИ, обусловленной приемом отраженного сигнала, с определением номера отсчета по дальности, соответствующего началу линии и угла наклона этой линии. При этом окончательное обнаружение объекта с выбором соответствующего порога по критерию Неймана-Пирсона проводится по результатам когерентного накопления.

Для обнаружения цели на РЛИ при некогерентном накоплении введем  $g = \overline{1, G}$  гипотез об угле  $\alpha_g = \alpha_{\max} + \frac{2\alpha_{\max}}{G} g$  наклона линии и преобразуем РЛИ следующим образом:

$$NN_{g,m} = \sum_{i=0}^{I-1} \left( (1 - \{i + m \cdot \text{tg}(\alpha_g)\}) R_{[i+m \cdot \text{tg}(\alpha_g)],m} + \{i + m \cdot \text{tg}(\alpha_g)\} R_{[i+m \cdot \text{tg}(\alpha_g)]+1,m} \right), \quad (1)$$

где  $\{x\}, [x]$  - операции взятия дробной части числа и округления до наименьшего целого, соответственно.

Операция (1) соответствует некогерентному накоплению отсчетов РЛИ вдоль линии  $i = -m \cdot \text{tg}(\alpha_g)$ , то есть согласованию участков НК с радиальной скоростью цели.

Обнаружение цели сводится к нахождению максимального значения  $\max_{g,m}(NN_{g,m})$  преобразованного РЛИ с одновременной оценкой радиальной скорости  $\hat{v}_r$  и дальности до цели:

$$\hat{v}_r = \frac{\text{tg}(\alpha_{g_{\max}})c}{2F_s T_r}; \quad \hat{r} = c(t_{\text{оп}} + m_{\max} / F_s) / 2, \quad (2)$$

$\alpha_{g_{\max}}$  - угол наклона линии;  $\{\alpha_{g_{\max}}, m_{\max}\} = \arg \max_{g,m}(NN_{g,m})$  - индексы, соответствующие максимальному значению пикселей преобразованного РЛИ.

Вид преобразованного РЛИ (в трехмерной форме) для тех же реализаций, что и на рис. 1г, е приведен на рис. 2.

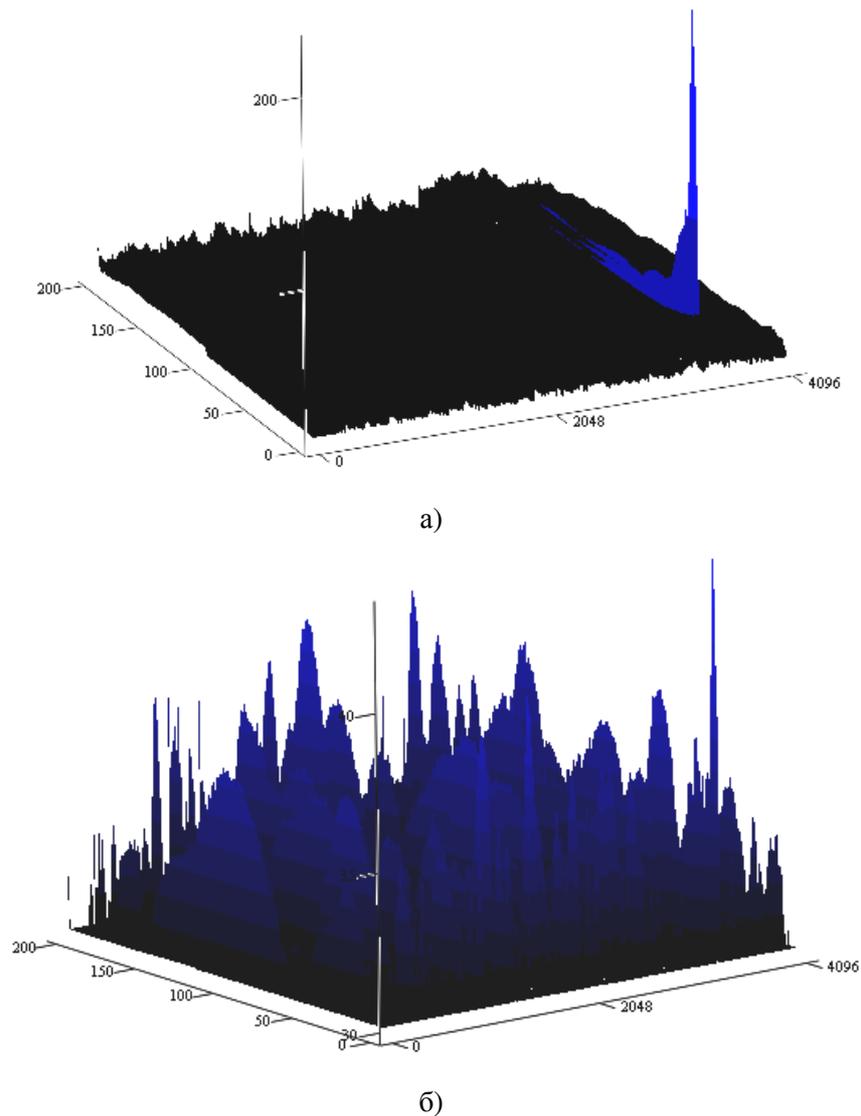


Рис. 2. Трехмерный вид преобразованного РЛИ для ОСШ 10 дБ (а) и 0 дБ (б)

Как видно из рис.2 после некогерентного накопления в направлении для значений  $m=3316$  и  $\alpha_g = 79,2^\circ$ , что соответствует истинному значению, при ОСШ 10 дБ сформировался четко выраженный максимум, величина которого существенно превышает значения отсчетов преобразованного РЛИ для других значений  $m$  и  $g$ . При ОСШ максимум также сформирован в требуемой точке, однако он выражен гораздо менее существенно.

#### **Б. ФАЗОКОДОМАНИПУЛИРОВАННЫЙ СИГНАЛ НА БАЗЕ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Для ФКМ-сигнала согласованная фильтрация одиночных сигналов должна проводиться для каждого из возможных значений доплеровской частоты с дискретностью по частоте  $\Delta F_d \approx 1/2T_0$ . Дальнейшей обработке подлежит совокупность РЛИ, каждая из которых соответствует заданной доплеровской скорости (углу наклона

линии). На рис. 3 показано РЛИ с использованием ФКМ сигнала на базе М-последовательности длиной 255 символов, что соответствует коэффициенту сжатия одиночного импульса на выходе СФ и приводит к более четкой и тонкой линии, чем в случае использования сигнала ЛЧМ с коэффициентом сжатия 100.

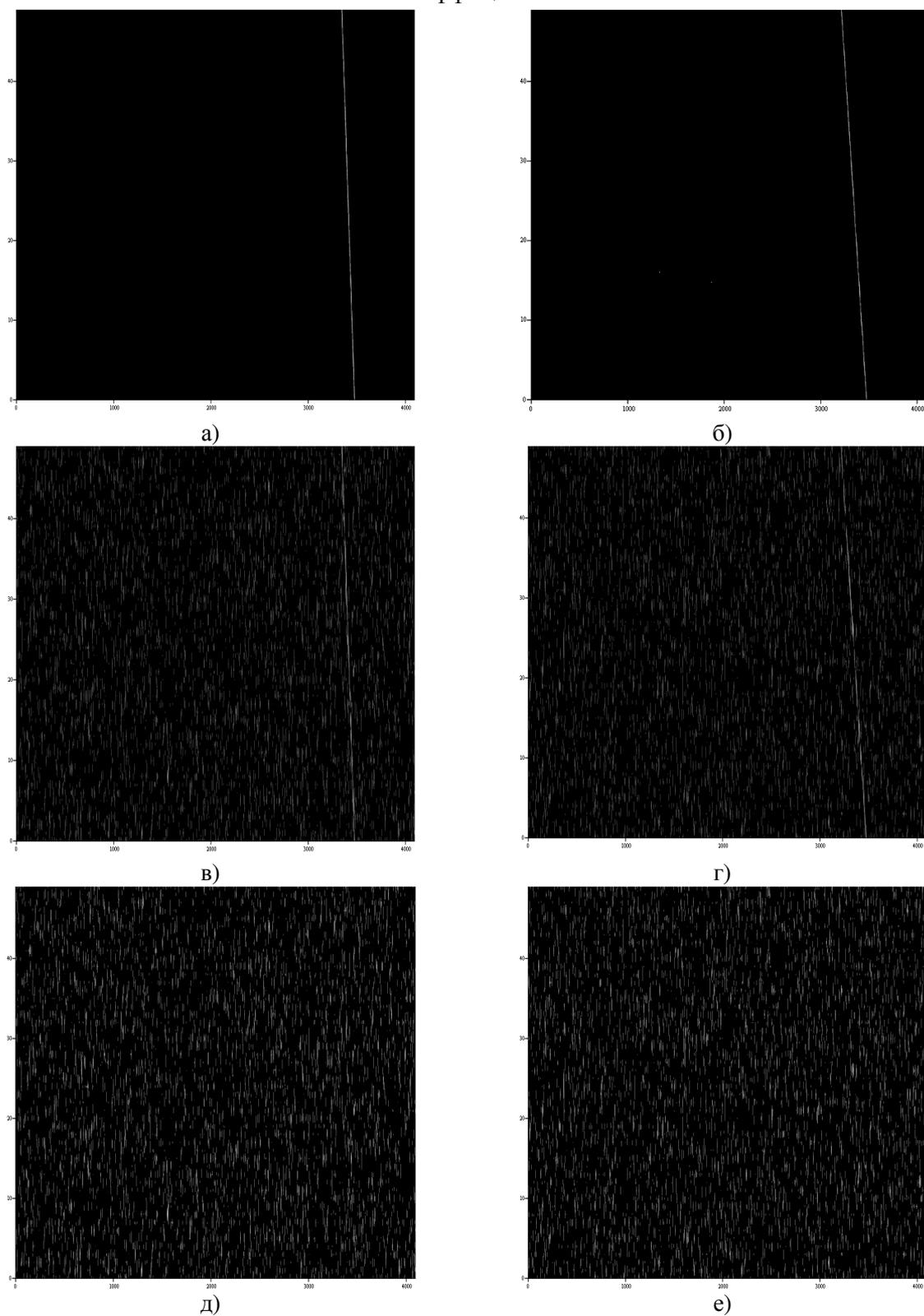


Рис. 3. Вид РЛИ при скорости цели 2 км/с (а, в, д) и 4 км/с (б, г, е) и отношении сигнал/шум по одиночному сигналу 20 дБ (а, б), 10 дБ (в, г) и 0 дБ (д, е), ФКМ-сигнал

На рис. 4 приведены результаты преобразования множества РЛИ, полученных при согласованной фильтрации одиночных ФКМ-сигнала для ОСШ 10 дБ и 0 дБ при скорости цели 2 км/с.

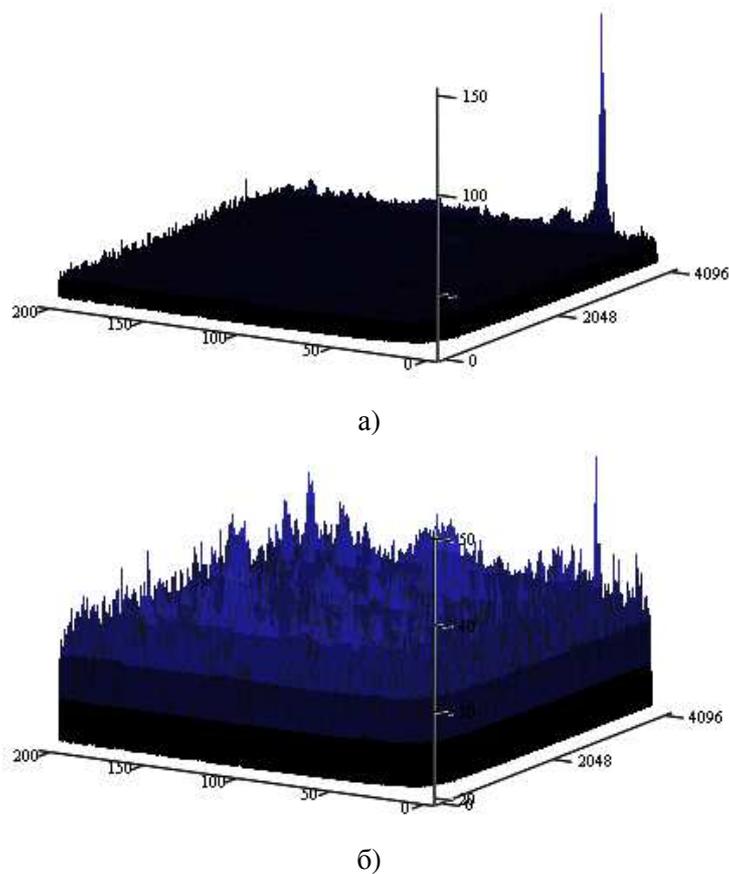


Рис. 4. Трехмерный вид преобразованного множества РЛИ при использовании ФКМ-сигнала для ОСШ 10 дБ (а) и 0 дБ (б)

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ

В таблице 1 для моделей отраженного сигнала в виде нефлуктуирующей пачки импульсов, медленно флуктуирующей пачки импульсов с интервалом корреляции 500 мс и быстрофлуктуирующей пачки импульсов приведены оценки частоты правильного обнаружения линии на преобразованном РЛИ, то есть того, что максимум на преобразованном радиолокационном изображении сформируется в точке, соответствующей правильному номеру отсчета (положения цели по времени задержки) и скорости цели. Рассматривались пачки ЛЧМ-сигналов при числе импульсов в пачке  $I = 50$  при частоте повторения  $T_r = 10$  мс. При обработке принималась частота дискретизации  $F_s = 4$  МГц, число отсчетов БПФ  $M = 1024$ . Оценки проводились по 100 реализациям.

Наилучшая вероятность правильного обнаружения линии будут иметь место при нефлуктуирующем и быстрофлуктуирующем отраженном сигнале. Для правильного обнаружения линии с вероятностью не менее 0,8 при использовании пачки сигналов из 50 импульсов требуется отношение сигнал/шум по пачке (при когерентном накоплении) порядка 17...18 дБ, по одному импульсу 0...1 дБ. Отметим, что для когерентного накопления при указанных энергетических соотношениях и вероятности ложной

тревоги  $10^{-6}$  вероятность правильного обнаружения составит 0,76...0,81, то есть предварительное некогерентное накопление оказывается вполне сравнимым по эффективности с когерентным.

Таблица 1. Вероятность обнаружения линии на радиолокационном изображении

Отношение сигнал/шум по пачке импульсов при когерентном накоплении, раз	Вероятность обнаружения линии при		
	нефлуктуирующем сигнале	медленно флуктуирующем сигнале	быстрофлуктуирующем сигнале
10	0	0,02	0
25	0,08	0,19	0,11
40	0,56	0,36	0,47
50	0,72	0,40	0,72
75	0,98	0,69	0,93
100	1,0	0,78	1,0
200	1,0	0,95	1,0

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые алгоритмы могут быть использованы для построения комплексных способов обнаружения высокоскоростных целей, включающих этапы некогерентного накопления с локализацией области нахождения цели по дальности и скорости и этап когерентного накопления в приемном устройстве с относительно небольшим числом каналов. С учетом специфики предлагаемых алгоритмов некогерентного накопления, основанных, фактически, на обработке радиолокационных изображений путем выделения характерных фрагментов на изображении, перспективным для решения указанной задачи является использование сверточных нейронных сетей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маркович И. И., Завтур Е. Е. Методы цифровой обработки сигналов, отраженных от высокоманевренных воздушных целей. // Вестник воздушно-космической обороны, 2016, Вып. 3 (11). - С. 17-23.
2. Чепкасов А. В., Сухоплюев А. В. Радиолокационный прием пачки импульсов большой длительности при обнаружении движущихся целей. // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2019, № 1. - С. 30-34
3. Порсев В. И., Николаев А. П., Кривоножко И. С. Многоканальное накопление радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростных целей, движущихся с ускорением. // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2018, № 1. - С. 23-34
4. Чепкасов А. В. Определение интервалов когерентного накопления пачки длинных импульсов при обнаружении высокоскоростной цели радиолокационной станцией с АФАР на твердотельных приборах. // Радиопромышленность, 2016. № 1. - С. 14-17
5. Кузьменков В. Ю., Логинов В. М. Способы и устройства совместного измерения радиальной скорости и радиального ускорения. // Радиотехника и электроника, 1997, Т. 42, № 12. – С. 1465-1475.
6. Kelly E. J. The radar measurement of range, velocity and acceleration // IRE Transactions, 1961, April MIL-5, No. 2. – Pp. 51-57
7. Архипов М. Ю., Николаев А. П. Алгоритмы накопления радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростной цели. // Антенны, 2013, № 1. – С. 57-61.

## REFERENCES

1. Markovich, I. I., Zavtur, E. E., Methods of digital processing of signals reflected from highly maneuverable air targets // Herald of the aerospace defense, 2016, Issue. 3 (11). – Pp. 17-23.
2. Chepkasov, A. V., Sukhoplyuev, A. V., Radar receiving of long pulse burst when detecting moving targets. // Bulletin of the Concern East-Kazakhstan Oblast Almaz – Antey, 2019, No. 1. – Pp. 30-34.
3. Porsev, V. I., Nikolaev A. P., Krivonozhko, I. S. Multi-channel integration of radiolocation signals reflected from acceleration high-speed targets. // Bulletin of the Concern East-Kazakhstan Oblast Almaz-Antey, 2018, No. 1. – Pp. 23-34.
4. Chepkasov, A. V. Definition of an interval of coherent accumulation of a pack of long radio impulses at detection of the high-speed purpose by a radar station with active phased - array antenna with solid-state devices. // Radio industry, 2016. No. 1. Pp. 14-17.
5. Kuzmenkov, V. Yu., Loginov, V. M., Methods and devices for joint measurement of radial velocity and radial acceleration. // Radio Engineering and Electronics, 1997, vol. 42, No. 12. – Pp. 1465-1475.
6. Kelly, E. J. The radar measurement of range, velocity and acceleration. // IRE Transactions, 1961, April MIL-5, No. 2. – Pp. 51-57.
7. Arkhipov, M. Yu., Nikolaev, A. P., Algorithms for the accumulation of radar signals reflected from a high-speed target. // Antennas, 2013, No. 1.– Pp. 57-61.