

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С НЕПРЕРЫВНЫМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Пьяе Пьюо Хлайнг, магистрант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. С использованием компьютерной модели выполнено исследование влияния дестабилизирующих факторов виде нелинейности закона изменения частоты, ограниченной разрядности аналого-цифрового преобразователя и наличия мешающих отражений от близко расположенных участков земной поверхности. Установлены количественные закономерности влияния указанных факторов.

Ключевые слова. Компьютерная модель, радиолокационная станция, непрерывное частотно-модулированное излучение, аналого-цифровое преобразование, разрядность, нелинейность закона модуляции.

Введение

Частотно-модулированный непрерывный волновой радар (FMCW) – это тип радиолокационной системы, которая передает непрерывный волновой сигнал с частотой, которая меняется со временем. В отличие от импульсных радиолокационных систем, которые излучают короткие импульсы энергии, FMCW-радары непрерывно передают и принимают сигналы, что позволяет проводить точные измерения дальности, скорости и угла цели. Эти радары широко используются в автомобильной, промышленной, аэрокосмической и оборонной промышленности благодаря своей высокой точности, низкому энергопотреблению и способности работать на коротких и средних дистанциях.

Технология FMCW-радаров привлекла значительное внимание в последние годы, особенно с ростом автономных транспортных средств, навигации дронов и интеллектуальных систем наблюдения. Ее способность обеспечивать измерения с высоким разрешением в режиме реального времени делает ее предпочтительным выбором для приложений, требующих надежного обнаружения и отслеживания объектов в динамических средах. По мере дальнейшего развития технологий обработки сигналов и полупроводников ожидается, что FMCW-радары будут играть еще большую роль в будущих автономных системах и интеллектуальной инфраструктуре.

Радар FMCW работает, передавая частотно-модулированный сигнал (обычно линейный чирп) и анализируя разницу частот между переданным и принятым сигналами для определения дальности и скорости цели. Основной принцип работы включает следующие этапы: передача сигнала: радар генерирует непрерывный волновой сигнал, частота которого линейно увеличивается или уменьшается со временем (пилообразная или треугольная модуляция); отражение сигнала – переданный сигнал отражается от цели и возвращается к приемнику радара после задержки по времени, пропорциональной расстоянию до цели; смешивание передаваемого и принимаемого сигнала и генерация частоты биений – полученный сигнал смешивается с переданным сигналом, создавая частоту биений (промежуточную частоту, ПЧ), которая содержит информацию о дальности и скорости цели; сигнал биений обрабатывается с использованием методов быстрого преобразования Фурье (БПФ) для извлечения дальности, доплеровского сдвига (для скорости) и угла (с использованием нескольких антенн в фазированных решетках).

Основными дестабилизирующими факторами для FMCW радиолокатора является ограниченная разрядность АЦП и нелинейность закона модуляции зондирующего сигнала.

Нелинейности частоты возникают из-за отклонений частоты сигнала от идеального закона изменения (например, в случае линейной частотной модуляции, ЛЧМ). Эти отклонения могут быть описаны как (рисунок 1)

$$\Delta f(t) = f_2(t) - f_1(t), \quad (1)$$

где $f_2(t)$ – закон изменения частоты сигнала, $f_1(t)$ – заданный (идеальный) закон изменения частоты сигнала.

Для количественной оценки нелинейностей используется интегральная нелинейность (INL):

$$INL_f = \sqrt{\frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} \Delta f^2(t) dt}, \quad (2)$$

где $T_r = T_0$ – длительность сигнала (равная периоду повторения).

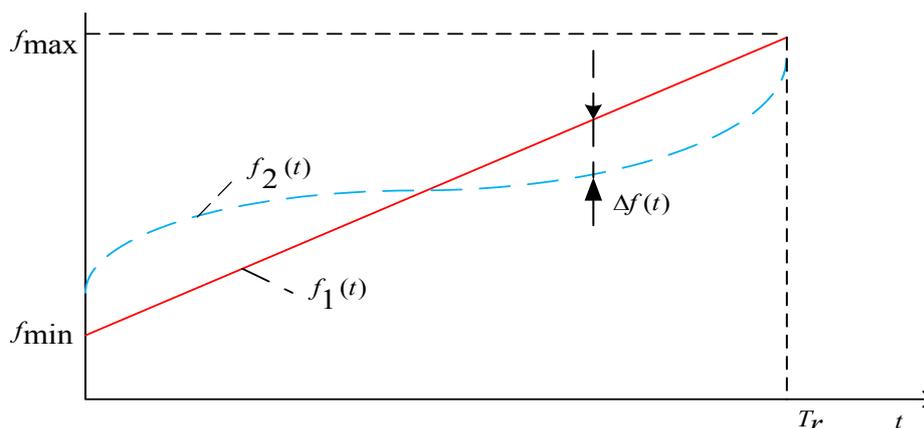


Рисунок 1 – Иллюстрация нелинейности закона изменения частоты зондирующего сигнала

Закон изменения фазы с учетом нелинейности частоты представим в виде:

$$\varphi_{tr}(t) = \pi \frac{\Delta f_0}{T_r} t^2 + 2\Delta f_H T_r \sin\left(\frac{\pi t}{T_r}\right), \quad (3)$$

где Δf_H - амплитуда нелинейности (при косинусоидальной нелинейности закона изменения частоты, которая обычно характерна для этих типов радаров – в середине периода повторения отклонение частоты близко к 0, на краях периода повторения отклонение максимально).

Закон изменения частоты с учетом нелинейности:

$$f_{tr}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi_{tr}(t) = \frac{\Delta f_0}{T_r} t + \Delta f_H \cos\left(\frac{\pi t}{T_r}\right). \quad (4)$$

Динамический диапазон аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который имеет N_{ADC} разрядов, определяют способность радара одновременно различать слабые и сильные сигналы. Динамический диапазон в дБ равен $D = 6,02N_{ADC}$ [дБ]. Низкая разрядность (менее 8 бит) уменьшает динамический диапазон, вызывая шум квантования, который маскирует слабые цели вблизи сильных отражателей. Высокая разрядность (12–16 бит) повышает чувствительность, но увеличивает вычислительную нагрузку и стоимость радиолокатора.

Цель статьи – оценка влияния дестабилизирующих факторов на эффективность обработки сигнала в FMCW-радиолокаторах методом компьютерного моделирования.

Исследования проводились с использованием компьютерной модели FMCW-радиолокатора, разработанной в MatLab. Подробное описание компьютерной модели приведено в [1].

Результаты оценки влияния нелинейности закона модуляции зондирующего сигнала

При исследовании эффективности принимались следующие исходные данные: ширина главного лепестка диаграмма направленности по азимуту 10° ; ширина главного лепестка диаграмма направленности по углу 30° ; длина волны 3 см; мощность излучения 1 Вт; коэффициент потерь 6 дБ; нелинейность девиации $0 \dots 0,1$ МГц; девиация частоты 150 МГц; частота повторения 1 кГц; частота дискретизации 4 МГц; время формирования сигнала 0.1 с; число разрядов АЦП $1 \dots 7$.

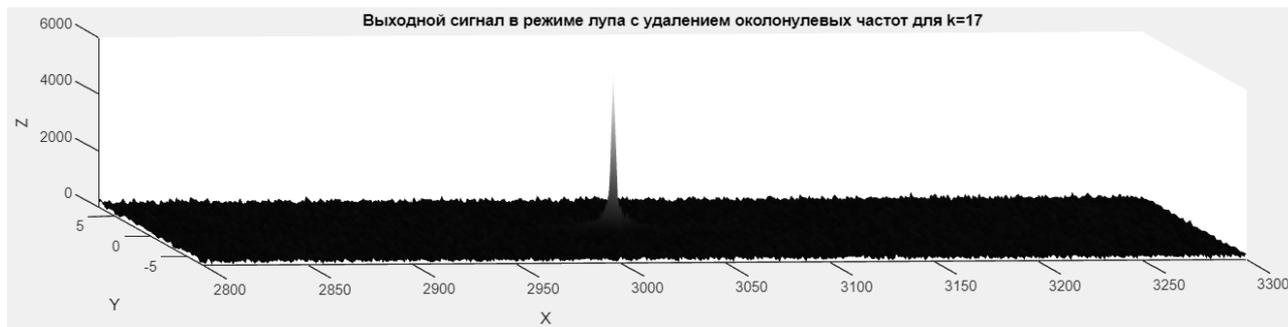
Результаты влияния нелинейности изменения частоты зондирующего сигнала приведены в таблице 1 (нормированное отношение сигнал/шум для разных значений амплитуды нелинейности) и на рисунке 2 (радиолокационные изображения точечной цели).

Таблица 1 – Влияние нелинейности закона модуляции на отношение сигнал/шум

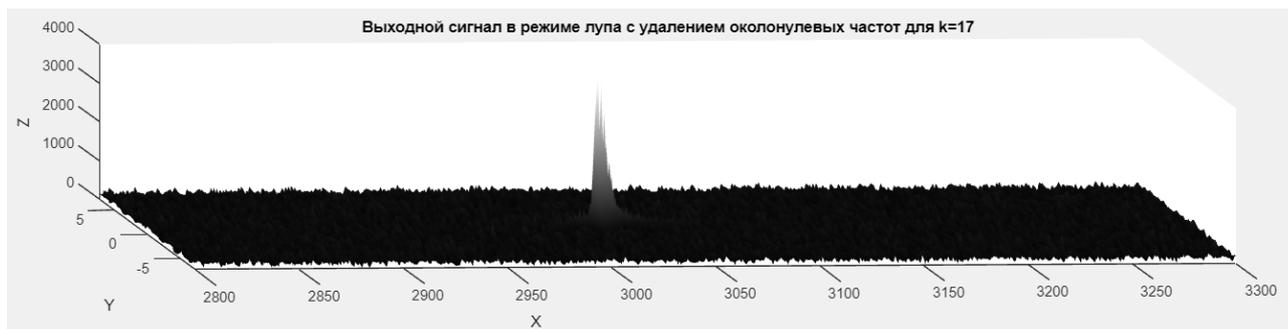
Амплитуда нелинейности закона изменения частоты	Нормированное отношение сигнал/шум по точечной цели
0	1.0
0.001	1.0
0.005	0.970
0.01	0.998
0.015	0.947
0.02	0.985
0.025	0.897
0.05	0.799

0.1

0.347



а – без нелинейности



б – амплитуда нелинейности 0.1 МГц

Рисунок 2 – Радиолокационные изображения точечной цели для различных значений амплитуды нелинейности закона изменения частоты: а – без нелинейности; б – амплитуда нелинейности 0,1 МГц

Как следует из результатов моделирования, амплитуда отклика от точечной цели на радиолокационном изображении при наличии нелинейности закона модуляции существенно уменьшается. Так, при амплитуде нелинейности 0,1 МГц отношение сигнал/шум снижается примерно в 3 раза по отношению к строго линейному закону изменения частоты. Кроме того, сильно увеличивается уровень боковых лепестков (рисунок 2). Если принять допустимый уровень снижения отношения сигнал/шум 1 дБ, то амплитуда нелинейности закона модуляции не должна превышать 0,05 МГц.

Результаты оценки влияния ограниченной разрядности АЦП на отношение сигнал/шум

В таблице 2 приведены значения нормированного отношения сигнал/шум по точечной цели в зависимости от числа разрядов АЦП. На рисунке 3 приведены радиолокационные изображения точечной цели для различной разрядности АЦП (7 и 1 бит).

Таблица 2 – Влияние разрядности АЦП на отношение сигнал шум по точечной цели

Число разрядов АЦП	Нормированное отношение сигнал шум по точечной цели
7	1
6	0.989
5	0.999
4	0.973
3	0.959
2	0.843
1	0.701

Как следует из результатов моделирования, амплитуда отклика от точечной цели на радиолокационном изображении при разрядности АЦП 7-бит обеспечивает заданное качество обработки. При уменьшении разрядности АЦП до 1 бит (не считая знакового разряда) отношение сигнал/шум уменьшается примерно на 1 дБ. Этот результат получен без учета мешающих отражений.

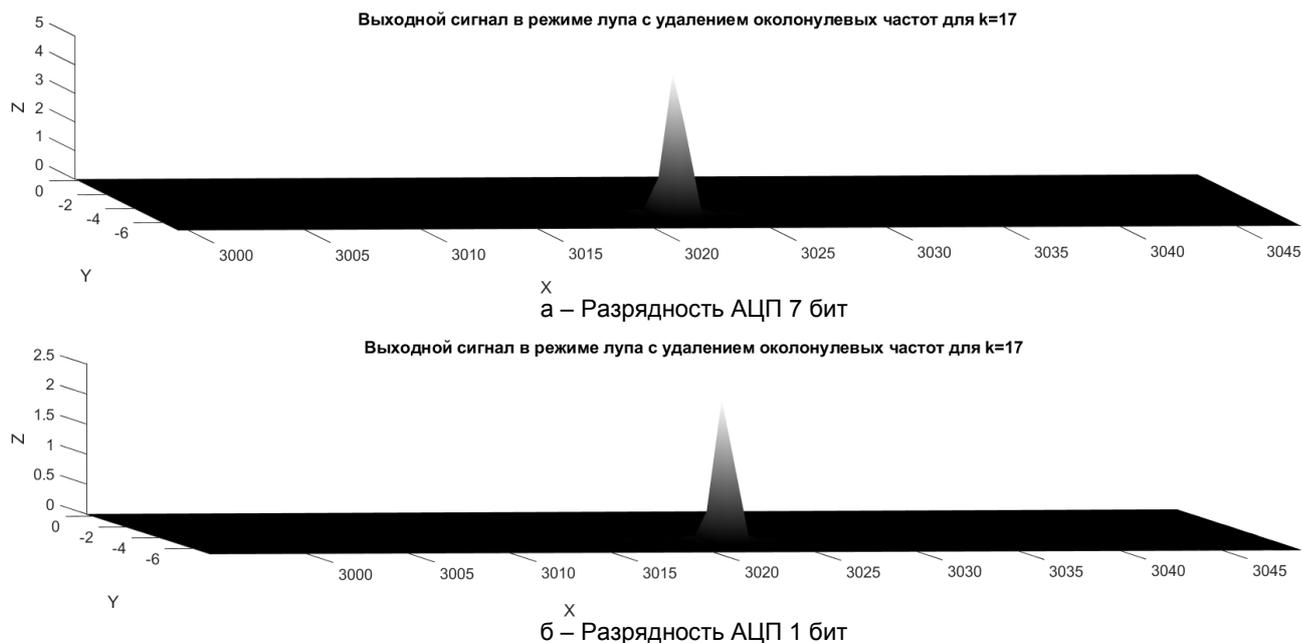


Рисунок 3 – Радиолокационные изображения точечной цели для случаев: а – разрядность АЦП 7 бит; б – разрядность АЦП 1 бит

Очевидно, что ограниченная разрядность АЦП будет более сильно сказываться при наличии мощных мешающих отражений от близко расположенных элементов земной поверхности. Это определяется тем, что в FMCW-радиолокаторе невозможно разделить сигналы по времени задержки. Поэтому сигнал от близко расположенных источников мешающих отражений будет приниматься совместно с сигналом от цели. Если динамический диапазон АЦП ограничен, то будет наблюдаться подавление слабого сигнала сильным.

Рассмотрим случай наличия близко расположенного участка земной поверхности с удельной ЭОП $\sigma_{уд} = 10^{-1} \text{ м}^2/\text{м}^2$ в диапазоне дальностей $r = 50 \dots 100 \text{ м}$ от радиолокатора (предполагается, что сигналы от более близких элементов земной поверхности режектируются во входном фильтре). При ширине главного лепестка диаграммы направленности радиолокатора по азимуту $\Delta\alpha = 10^\circ$ и разрешающей способности по дальности $\Delta r = 1 \text{ м}$, площадь элемента разрешения на земной поверхности составит $8,7 \dots 17,4 \text{ м}^2$, а его ЭОП составит $0,87 \dots 1,74 \text{ м}^2$. Отношение мешающие отражения/шум в одном элементе при мощности будет определяться выражением

$$\gamma_{\text{МО}} = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{P_{tr} G^2 \sigma_{уд} \Delta\alpha \Delta r \lambda^2 \gamma_{loss}}{(4\pi)^3 r^3 N_0 F_s} dr = \frac{P_{tr} G^2 \sigma_{уд} \Delta\alpha \Delta r \lambda^2 \gamma_{loss}}{(4\pi)^3 N_0 F_s} \left(\frac{1}{r_{\text{min}}^2} - \frac{1}{r_{\text{max}}^2} \right),$$

где P_{tr} – мощность излучения радиолокатора; $\sigma_{уд}$ – коэффициент усиления антенны; $\sigma_{уд}$ – удельная ЭОП земной поверхности; $\Delta\alpha, \Delta r$ – ширина главного лепестка диаграммы направленности радиолокатора по азимуту и разрешающая способность по азимуту; λ – длина волны; γ_{loss} – коэффициент потерь полезного сигнала; $r_{\text{min}}, r_{\text{max}}$ – минимальная и максимальная дальность мешающих отражений; N_0 – спектральная плотность мощности внутренних шумов; F_s – частота дискретизации.

При $P_{tr} = 1 \text{ Вт}$; $G = 120$; $\sigma_{уд} = 0,1$; $\Delta\alpha = 10^\circ$, $\Delta r = 1 \text{ м}$; $\lambda = 3 \text{ см}$; $N_0 = 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}$; $F_s = 4 \text{ МГц}$;

$\gamma_{loss} = -6 \text{ дБ}$; $r_{\text{min}} = 50 \text{ м}$; $r_{\text{max}} = 100 \text{ м}$ получим отношение сигнал/шум по мешающим отражениям $\gamma_{\text{МО}} = 50,1 \text{ дБ}$. Значение младшего разряда АЦП в радиолокаторе соответствовало одной трети среднеквадратического значения шума, следовательно на шумы приходилось примерно $20 \dots 24 \text{ дБ}$ динамического диапазона. Поэтому можно ожидать, что ограниченная разрядность будет проявляться при разрядности АЦП менее 12 разрядов (без знакового), так как 1 разряд АЦП соответствует 6 дБ динамического диапазона [4].

На рисунке приведены РЛИ для указанного случая при разрядности АЦП 16, 14, 12 и 10 разрядов. Радиолокационная цель – среднеразмерный самолет с длиной $9,5 \text{ м}$ и средней ЭОП 6 м^2 . При сжати

по дальности использовано окно Кайзера с параметров 3,5. Показано РЛИ на участке 2800...3300 м. Радиолокационная цель обведена на рисунке 4а.

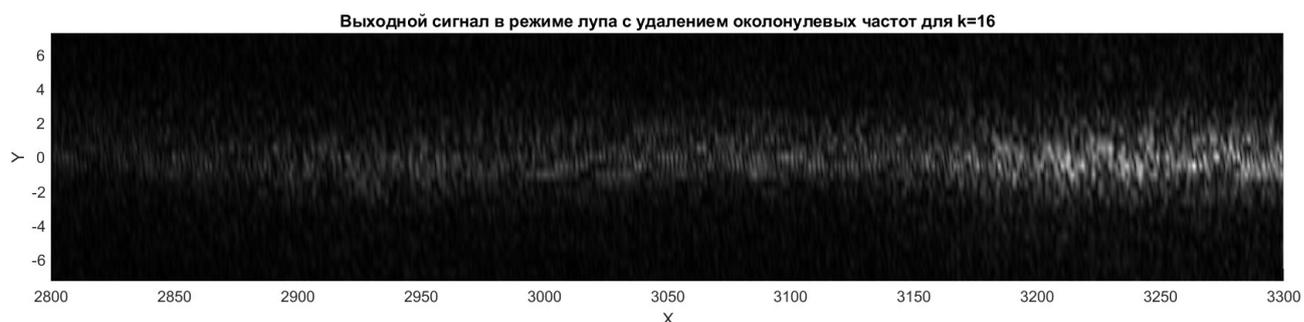
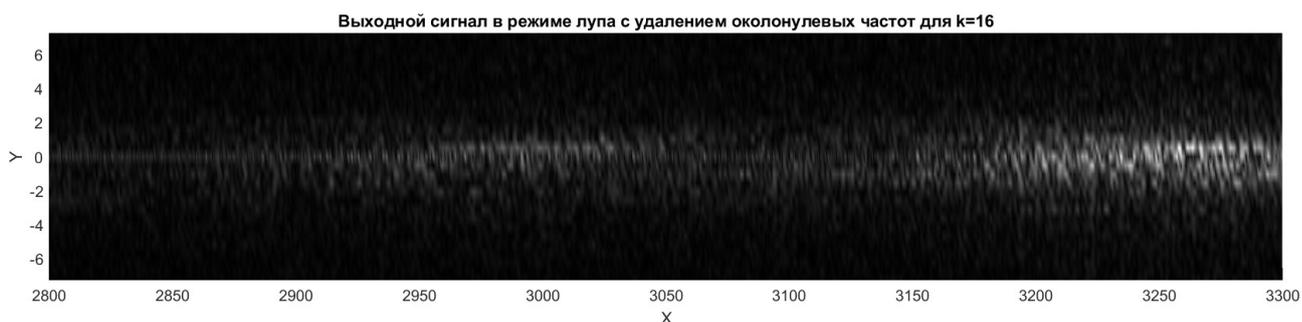
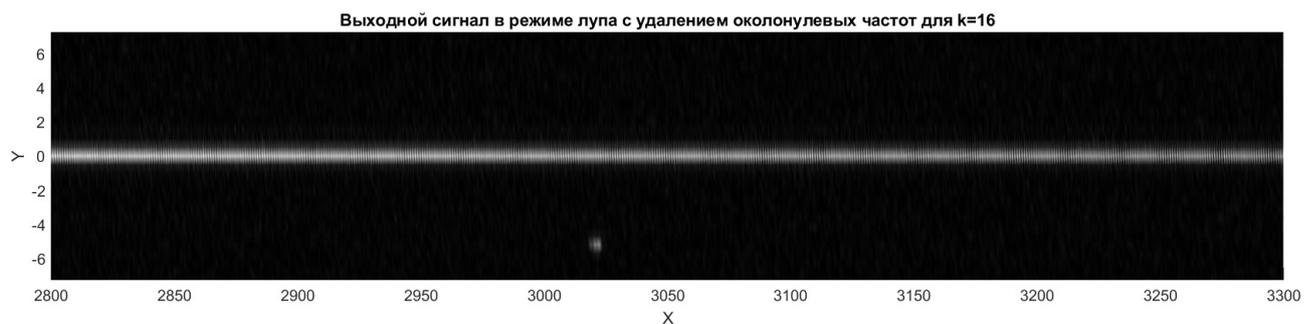
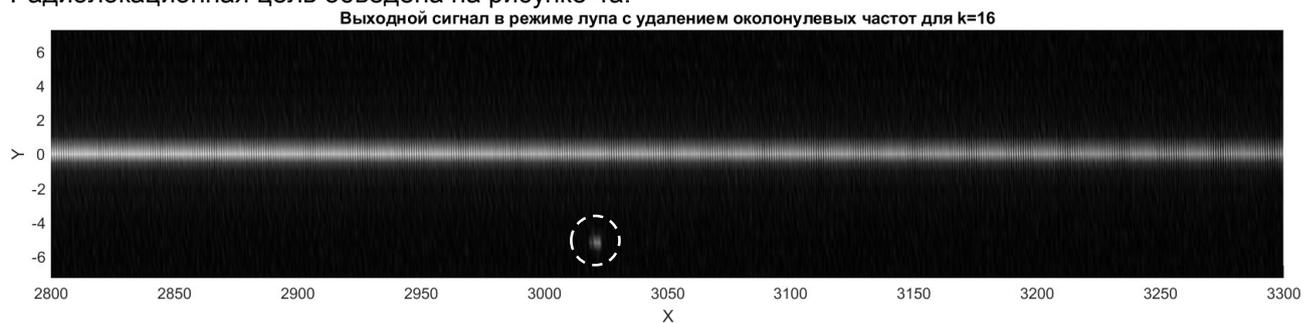


Рисунок 4 – Радиолокационные изображения самолета при разном числе разрядов АЦП

Горизонтальная линия посредине радиолокационных изображений – это остатки мешающих отражений на выходе БПФ при сжатии сигнала по дальности. При достаточном динамическом диапазоне они локализованы по скорости (рисунок 4а, б). При уменьшении числа разрядов АЦП спектр доплеровских частот обогащается и указанные остатки маскируют отраженный сигнал во всем диапазоне доплеровских частот.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что разрядность АЦП при наличии интенсивных мешающих отражений от близких к радиолокатору участках земной поверхности сильно сказывается на качестве радиолокационных изображений. В типовых условиях при минимальной дальности до радиолокатора порядка 50 м необходимо использовать АЦП с минимальным числом разрядов 12-14. При увеличении минимальной дальности число разрядов может быть меньше.

Список использованных источников:

1. Пьяе Пью Хлайнг. Модель и результаты компьютерная модель радиолокационной станций с непрерывным частотно-модулированным излучением / Пьяе Пью Хлайнг // Международный научно-технический семинар <<Технологии передачи и обработки информации>>: материалы международного научно-технического семинара (Респ. Беларусь, Минск, 5–15 апр. 2025 г.) / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2025.
2. Bassem R. Mahafza. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 2000. – 743 p.
3. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б.. *Малогобаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением*, 2020. – 270 с.
4. William L. Melvin, James A. Scheer. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*, 2013. – 829 p.

UDC 621.396

STUDY OF THE INFLUENCE OF DESTABILISING FACTORS ON THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF A RADAR STATION WITH CONTINUOUS FREQUENCY–MODULATED RADIATION

Pyae Phyho Hlaing, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Using a computer model, a study was made of the influence of destabilizing factors in the form of nonlinearity of the frequency change law, limited bit depth of the analog-to-digital converter, and the presence of interfering reflections from closely located areas of the earth's surface. Quantitative patterns of the influence of these factors were established.

Keywords. Computer model, radar station, continuous frequency–modulated radiation, analog-to-digital conversion, bit depth, nonlinearity of the modulation law.