

# ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.396:681.33

*И.В. БАРЫШЕВ, д-р техн. наук, К.А. ЩЕРБИНА, канд. техн. наук,  
Е.П. МСАЛЛАМ, канд. техн. наук, К.Н. НЕЖАЛЬСКАЯ, канд. техн. наук,  
М.А. ВОНСОВИЧ, О.С. ИНКАРБАЕВА*

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ СИГНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ ПРИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ

### Введение

В современных береговых радиолокационных станциях (БРЛС) с цифровой обработкой координатной информации постоянно действуют различные процедуры тестового контроля работы алгоритмов программно-математического обеспечения (ПМО), основная задача которых состоит в текущей оценке погрешностей определения радиолокационных координат и величины смещения сопровождаемого объекта от оси фарватера со среднеквадратическими ошибками не хуже требуемых. Например, при разрешающей способности БРЛС по дальности не хуже 15 м (длительность зондирующего импульса  $\tau_u = 0,1 \mu\text{S}$ ) и ширине диаграммы направленности в азимутальной плоскости не более 0,5 град среднеквадратические отклонения ошибки не должны превышать: по дальности – 7 м; по азимуту (пеленгу) – 0,1 град.

При этом среднеквадратическая ошибка определения смещения судна от продольной оси фарватера в зависимости от дальности и ракурса лежит в пределах 5 м на дальностях до одной мили и ракурсе  $\pm 90^\circ \pm 30^\circ$ , на дальности 10 миль и том же ракурсе ошибка смещения составляет примерно 14 м [1 – 3].

Процедура тестовой проверки способности алгоритмов ПМО должна обеспечивать требуемые среднеквадратические ошибки и достаточно сложна. Обычно она выполняется с использованием одного из двух методов:

а) прямой или «абсолютный» метод, выполнение которого требует применения дополнительной измерительной системы, обеспечивающей «эталонные» измерения параметров траектории движения судна, точность которых на порядок выше точности радиолокационных измерений;

б) косвенный или «относительный» метод, выполнение которого требует подбора траекторий движения судов, параметры которых по геометрической конфигурации мало отличаются от геометрического профиля центральной линии фарватера. При этом в процессе тестирования необходимо выбирать нормальные метеоусловия и нулевую бальность морского волнения.

Дальнейшее совершенствование и расширение функциональных возможностей ПМО, его универсализации, оперативности, адаптации к изменяющейся помеховой обстановке предопределяют существенное улучшение тактико-технических характеристик современных береговых РЛС [4 – 7].

В частности, это относится к программной реализации современных средств помехоподавления, основанных на извлечении информации о помеховой обстановке непосредственно из радиолокационных наблюдений: например адаптивной ВАРУ, оптимизации цифровой внутрипериодной и межпериодной обработки с целью автоматической регулировкой уровня ложных тревог по дальности, межпериодного подавления нерегулярных дискретных помех с применением статистических процедур и т.д.

Вместе с тем необходимо решать практические задачи, связанные с конкретным назначением и использованием БРЛС, определяемыми реальными условиями и возможностями (геометрическими параметрами зоны обслуживания типами судов, условиями размещения сооружений и оборудования) [8, 9].

В настоящей статье представлены результаты решения задачи эвристического синтеза тестовых сигнальных моделей пассивных помех при аналого-цифровом преобразовании выходного видеосигнала аналоговой части БРЛС с учетом оговоренных выше особенностей конкретного функционирования [10, 11].

### Результаты компьютерного моделирования

Исходные данные для моделирования выбирались с использованием тактико-технических характеристик береговых РЛС [12]. Моделирование осуществлялось для цифровых моделей упрощенного вида, хорошо соответствующих реальным условиям функционирования БРЛС в пределах изменения дальностей до 5 км и азимутальных углов в пределах 10с. Удельная эффективная площадь рассеивания (ЭПР) морской поверхности считалась постоянной величиной, находящейся в пределах -30 -50 дБ. Среднеквадратическое отклонение флуктуаций удельной ЭПР моря выбиралась в пределах 4-8 дБ. В качестве технических характеристик БРЛС и их величин были выбраны:

- импульсная мощность излучения  $P_u = 10^4$  Вт;
- длительность зондирующего импульса  $\tau_u = 0,1$  мкс;
- длина волны излучения  $\lambda = 0,03$  м;
- дистанция «мертвой» зоны  $R_0 = 100$  м;
- ширина диаграммы направленности:  
в азимутальной плоскости  $\theta_\Gamma = 1^\circ$  ,  
в угломестной плоскости  $\theta_B = 25^\circ$  ;
- дискретность отсчетов АЦП по дальности  $\Delta D = 15$  м;
- общее число отсчетов дальности  $N = 512$  ;
- коэффициент усиления антенны РЛС  $G_\Gamma = 30$  дБ;
- скорость света в вакууме  $c = 3 \times 10^8$  м/с;
- общее число отсчетов азимута  $M = 100$  ;
- дискретность отсчетов азимута  $\Delta\phi = 0,5^\circ$  .

### Одномерная цифровая тестовая модель радиолокационных отражений от взволнованной морской поверхности

При цифровом моделировании одномерной модели радиолокационных отражений от морской поверхности использовалось упрощенное соотношение (1) без учета флуктуаций удельной ЭПР

$$|I(i\Delta D)| = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \times 10^{\frac{\sigma^0}{10}} \times \frac{\theta_\Gamma c \tau_u}{2(R_0 + i\Delta D)^3}, \quad (1)$$

а также с учетом флуктуаций

$$|I(i\Delta D)| = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \times 10^{\frac{\sigma^0 + S_i}{10}} \times \frac{\theta_\Gamma c \tau_u}{2(R_0 + i\Delta D)^3}.$$

При этом модельные флуктуации для каждого  $i$ -го отсчета формировались, как флуктуации удельной ЭПР морской поверхности в виде одномерного быстроменяющегося случайного процесса

$$S_i = \left| \bar{\sigma}^0 \right| - \text{rnd} \left( 2 \left| \bar{\sigma}^0 \right| \right), \quad (2)$$

где  $rnd\left(2|\tilde{\sigma}^0\right)$  – равномерная выборка случайных чисел с логонормальным законом распределения в заданном интервале их максимального и минимально значения, и медленно меняющегося одномерного случайного процесса с прореживанием тактовых отсчетов АЦП в 10 раз:

$$S_i = \frac{2}{T+1} \sum_{j=0}^T S_{i+j},$$

где  $T=10$ ,  $i=0 \dots N-T$ ;  $|\tilde{\sigma}|$  – СКО флуктуаций удельной ЭПР в дБ.

На рис. 1 *a*, *б* представлены результаты моделирования при  $\sigma^0 = -40$  дБ, значениях СКО флуктуаций морской поверхности – 4, 8 дБ и изменении дальности  $i = 500$ .

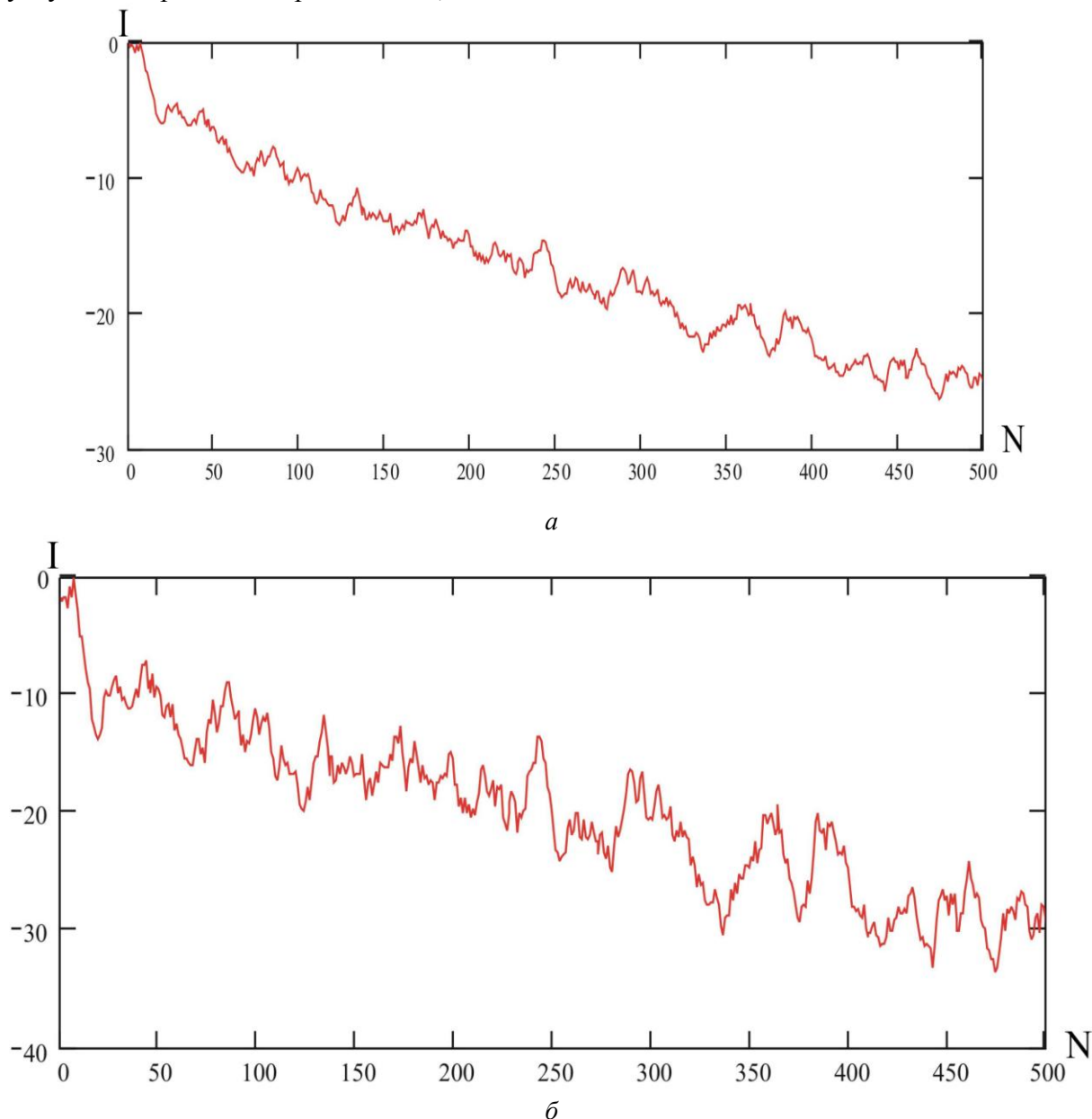


Рис. 1. Цифровая тестовая модель при  $\sigma = -40$  дБ : *a* –  $|\tilde{\sigma}^0| = 4$  дБ,  $A = 4 \cdot 10^{-8}$ ; *б* –  $|\tilde{\sigma}^0| = 8$  дБ,  $A = 4 \cdot 10^{-8}$

Как видно из приведенных на рис. 1 *a, б* зависимостей, величина флуктуаций удельной ЭПР оказывает сильное влияние на форму радиолокационных отражений от взволнованной морской поверхности.

### Двумерная цифровая тестовая модель радиолокационных отражений, создаваемых взволнованной поверхностью

Компьютерное моделирование данной цифровой модели выполнялось в следующем порядке.

1. При выбранных ранее исходных данных о параметрах береговой РЛС были смоделированы одномерные отсчеты интенсивности  $I_i$ , как функции дальности на периоде зондирования без учета флуктуаций удельной ЭПР.

$$I_i = \frac{P_u G}{(4\pi)^2 (R_0 + i\Delta D)^3} 10^{\frac{\sigma^0}{10}}.$$

Результаты моделирования приведены на рис. 2.

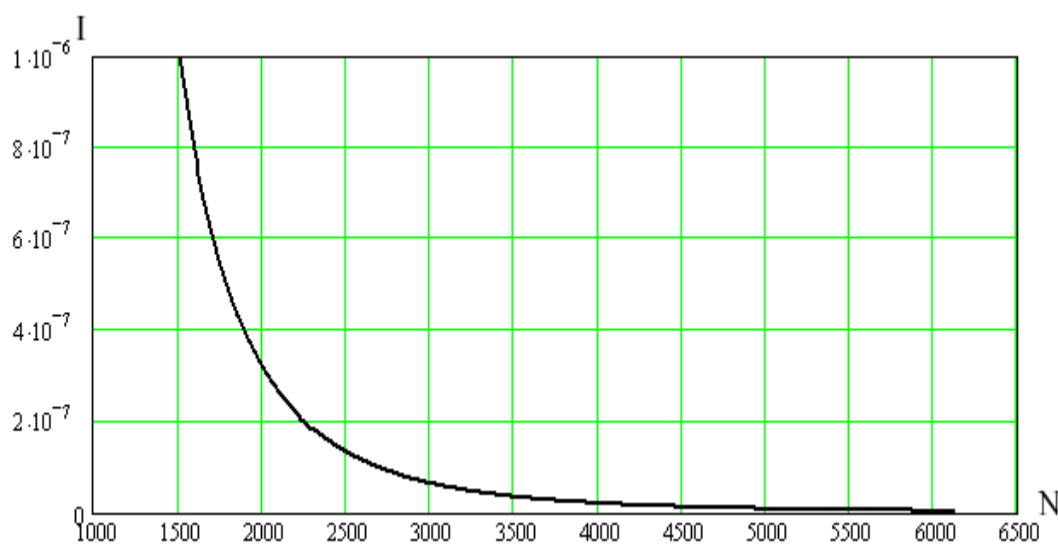


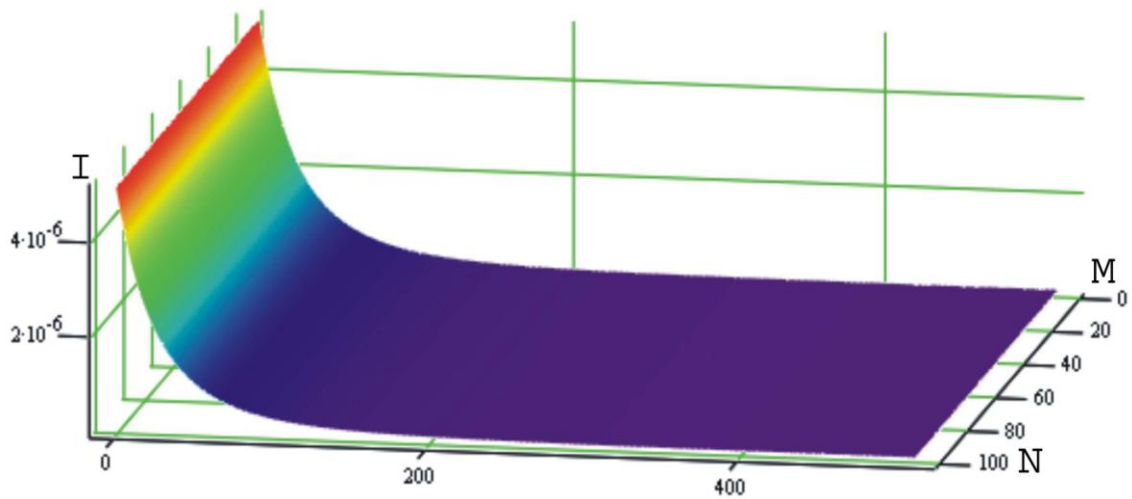
Рис. 2. Отсчеты интенсивности сигнала отраженного от морской поверхности для фиксированного азимута

2. Полученный результат использовался для формирования двумерного цифрового профиля отсчетов интенсивности  $I_{ij}$  в диапазоне изменения азимута  $\theta = 0 \div 100^\circ$ . Результаты моделирования приведены на рис. 3 *a, б, в*. На рис. 3, *a* показан двухмерный профиль без учета главного хода волн; на рис. 3, *б* показан двухмерный профиль с учетом главного хода волн; на рис. 3, *в* показан тот же профиль, но с использованием логарифмического масштаба по координате интенсивностей.

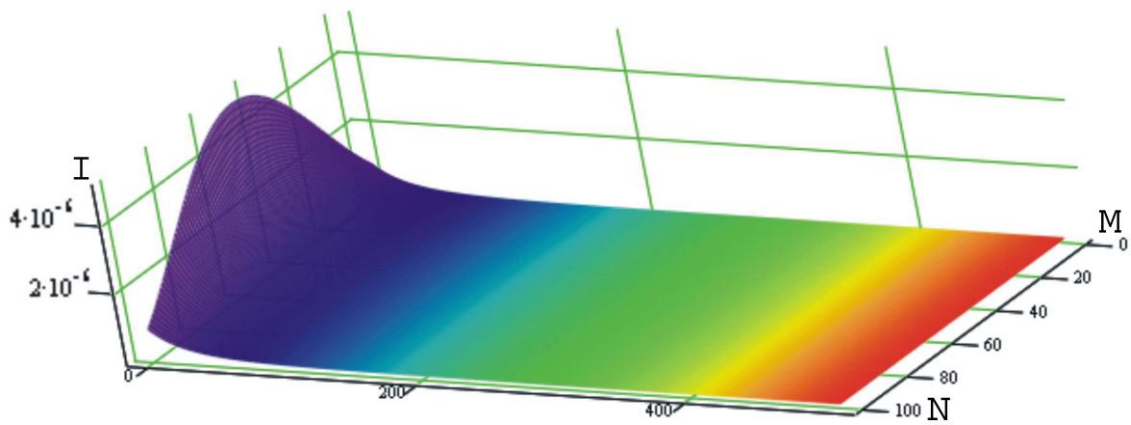
3. На этом этапе моделировались флуктуации удельной ЭПР морской поверхности

$$S_{ij} = \frac{2}{T+1} \sum_{K=0}^{20} \left( \tilde{\sigma}^0 - rnd\left(2 \times \tilde{\sigma}^0\right) \right),$$

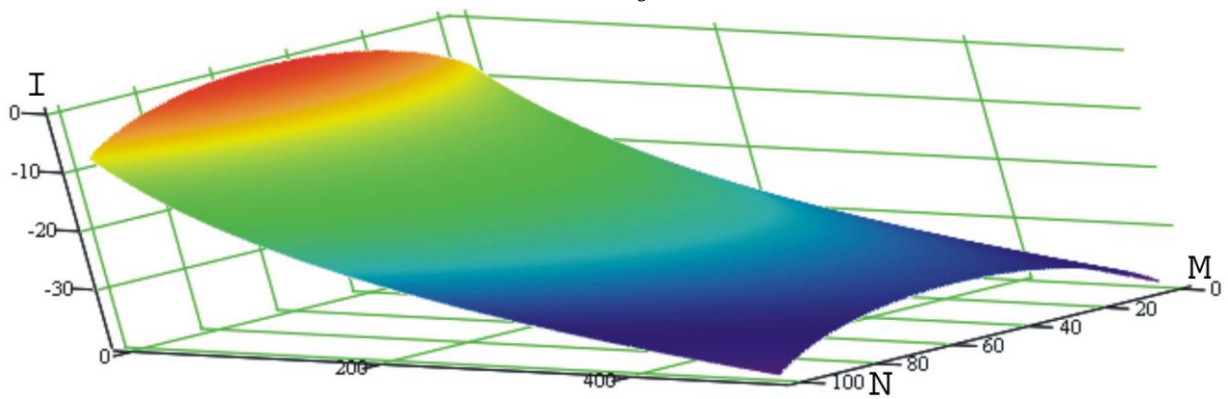
где  $rnd\left(2 \times \tilde{\sigma}^0\right)$  – равномерная выборка случайных чисел с логонормальным законом распределения в заданном интервале  $\left|2 \times \tilde{\sigma}^0\right|, \left|\tilde{\sigma}^0\right| = 2$  дБ.



*a*



*б*



*в*

Рис. 3. Двумерный опорный профиль интенсивностей локальных источников рассеивания

На рис. 4 и 5 показаны произвольные одномерные срезы флуктуаций удельной ЭПР по дальности и азимуту.

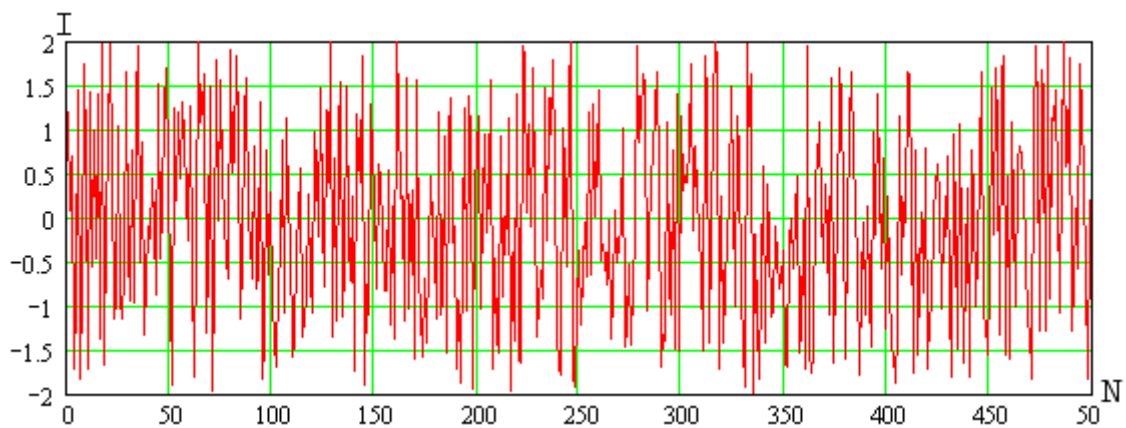


Рис. 4. Срез по дальности для быстро меняющегося процесса флуктуаций ЭПР

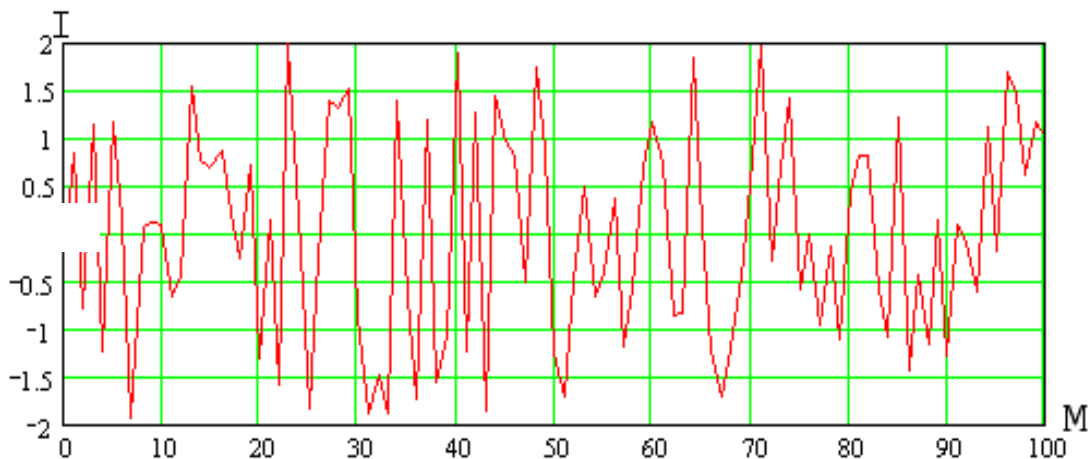


Рис. 5. Срез по азимуту

На рис. 6 и 7 показаны произвольные срезы флуктуаций удельной ЭПР по дальности и азимуту с коэффициентом прореживания отсчетов  $T = 20$ , которые условно названы медленно меняющимися. Расчет флуктуаций удельной ЭПР выполнялся в соответствии с выражением

$$S_{ij} = \frac{2}{T+1} \sum_{K=0}^{20} \left( \tilde{\sigma}^0 - \text{rnd}(2 \times \tilde{\sigma}^0) \right).$$



Рис. 6. Срез по дальности для медленно меняющегося процесса флуктуаций ЭПР

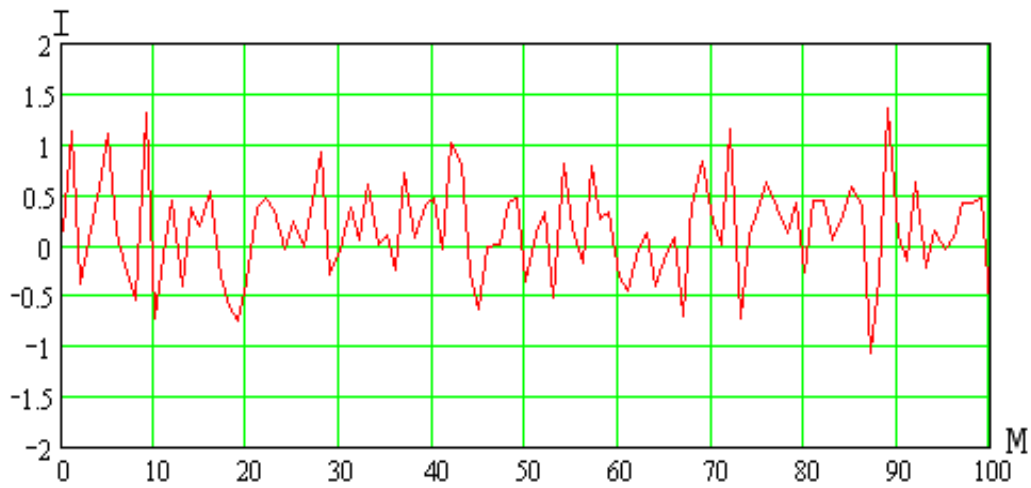


Рис. 7. Срез по азимуту для медленно меняющегося процесса флуктуаций удельной ЭПР

4. На последнем этапе моделирования выполнялось цифровое суммирование двумерного профиля интенсивности и медленных флуктуаций удельной ЭПР. Результаты суммирования приведены на рис. 8 и 9.

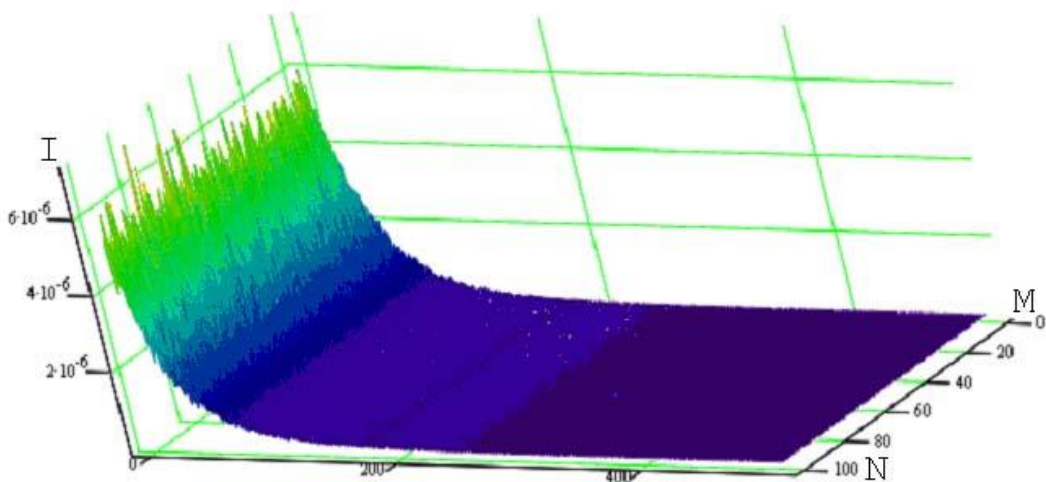


Рис. 8. Отраженный от морской поверхности сигнал с наложенной помехой

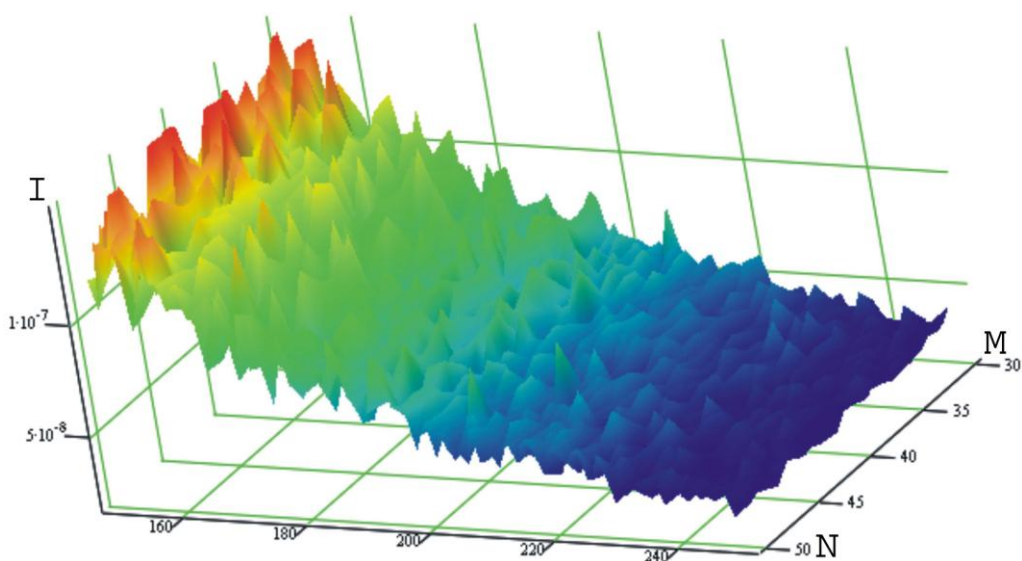


Рис. 9. Фрагмент радиолокационных отражений от взволнованной морской поверхности

## Заключение

На основе анализа теоретической модели многолучевого канала с рассеянием и моделей помех от подстилающей поверхности, конкретизированных для взволнованной морской поверхности, а также помех от гидрометеообразований в виде дождевых осадков, разработаны (синтезированы) на эвристическом уровне цифровые сигнальные модели радиолокационных отражений для одномерной и двумерной структурно-физической модели сигнала. Проанализирована возможность практической реализации упрощенной тестовой модели радиолокационного зондирования морской поверхности реальной береговой РЛС.

При разработке цифровых моделей учтены особенности функционирования береговых РЛС, их технические и тактические характеристики, состояние морской поверхности, воздействие метеоусловий. К числу основных результатов можно отнести следующие:

- на основе существующих радиофизических моделей рассеяния радиолокационных сигналов от морской поверхности разработаны (синтезированы) тестовые сигнальные цифровые модели, учитывающие особенности аналого-цифрового преобразования видеосигнала;
- предложены упрощенные цифровые тестовые модели радиолокационных отражений от морской поверхности, учитывающие особенности функционирования БРЛС;
- разработаны упрощенные цифровые модели радиолокационных отражений от гидрометеообразований (дождевых осадков);
- проведено компьютерное моделирование упрощенных тестовых моделей радиолокационных сигналов, отраженных морской поверхностью;
- результаты выполненных исследований в дальнейшем будут использованы при решении задачи определения координат местоположения протяженных морских объектов, и кроме того они могут быть использованы при решении аналогичных задач при разработке цифровой радиолокационной техники.

### Список литературы:

1. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. Москва : Радио и связь, 1986. 184 с.
2. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. Москва : Сов. радио, 1975. 248 с.
3. Kulemin G.P. Millimeter-wave radar targets and clutter, Boston (USA), Artech House, 2003.
4. Wilson I.D. Probability of detection aircraft targets // IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst. 1972. AES-8. №6. P. 757-762.
5. Vonsovich M. A. The phase-locked loop system with combined control of the variable-frequency oscillator / M.A. Vonsovich, V. V. Pechenin, K. A. Shcherbina, E.P. Msallam // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76. №15 С. 1617-633.
6. Кулемин Г.П., Горошко Е.А. Модель помехи, создаваемой обратным рассеянием от моря, в диапазоне частот 1-100 ГГц // Радиофизика и электроника. 2002. Т.6, №2-3. С. 226-234.
7. Ван-Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции ; пер. с англ. Т.3. Москва : Сов. радио, 1977. 662с.
8. Volosyuk V.K. Phenomenological description of coherent radar images based on concepts of the measure of set and stochastic integral / V.K. Volosyuk, S.S. Zhila, D.V. Kolesnikov // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78. №1. P. 19-30.
9. Koshevoy N.D. Optimum planing of experiment in manufacturing the electronic equipment / N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, V.A. Gordienko, V.P. Syrooklyn // Telecommunications and Radio Engineering. 2011. Vol. 70. №8. P. 731-734.
10. Мсаллам Е.П., Печенин В.В. Эвристический синтез цифровой модели радиолокационного сигнала, рассеянного совокупностью протяженных объектов // Радиоэлектронные и компьютерные системы. Харьков : ХАИ, 2004. №2. С. 16-21.
11. Печенин В.В., Мсаллам Е.П., Усиченко А.В. Цифровая модель радиолокационного сигнала, рассеянного подстилающей водной поверхностью под малым углом скольжения // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Сб. науч. тр. «Системный анализ, управление и информационные технологии». Харьков, 2004. №36. С. 100-104.
12. Vonsovich M. A. Development and studying of the channel for forced tuning of the Doppler tracking filter of the FM-Signal, reflected from a substrate surface / M.A. Vonsovich, V. V. Pechenin, K. A. Shcherbina // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. ol. 15. №15. С. 1343-1353.