

УДК.621.396.96:621.371.3

В.В. Печенин<sup>1</sup>, К.А. Щербина<sup>1</sup>, А.И. Кравченко<sup>2</sup>, Е.П. Мсаллам<sup>1</sup>, М.А. Вонсович<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*<sup>2</sup> *ГП "Администрация морских портов Украины", филиал "Дельта-Лоцман", Николаев*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕГУЛЯРНОГО ДАЛЬНОМЕРНОГО ПРОФИЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ПРОТЯЖЕННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*На основе цифровой модели радиолокационных отражений от морской поверхности и известных аналитических методов и сопутствующих им алгоритмов сглаживания флуктуационной компоненты цифровой модели выполнен сравнительный анализ точности восстановления регулярного дальномерного профиля отражений. Результаты исследований дают основание сделать выводы о том, что реальные условия функционирования радиолокационных средств обнаружения-сопровождения морских судов не дают предпочтения ни одному из методов восстановления. Следовательно, необходимы программные процедуры восстановления регулярного профиля по всем методам и только тогда выбирать лучший из них.*

**Ключевые слова:** отражения, дальность, сопровождения, дальномерный профиль, обнаружение, интенсивность.

### Введение

На современном этапе и в обозримом будущем модернизация существующих и разработке перспективных радиотехнических средств обнаружения, координатных измерений и сопровождения различных объектов, движущихся вблизи подстилающей поверхности или непосредственно на самой поверхности связано, прежде всего, с поиском эффективных методов и алгоритмов уменьшения помеховых отражателей, создаваемых случайной радиофизической структурой самой отражающей поверхности.

Наглядным примером существенного влияния помеховых отражений от отражающей поверхности является обнаружение и координатное сопровождение крупногабаритных воздушных и морских судов, космических станций и так далее. Наиболее сложной в плане решения задачи обнаружения-сопровождения является обнаружение и координатное сопровождение объектов, движущихся непосредственно по водной, земной и иной поверхности, создающей помеховые радиолокационные отражения.

В настоящее время для обеспечения требуемых характеристик – обнаружения-сопровождения многих объектов, движущихся по морской поверхности широкое применение находят автоматизированные радиотехнические системы (АРТС) [1]. Основным первичным источником информации в АРТС являются береговые радиолокационные станции (БРЛС).

В процессе активного функционирования БРЛС интенсивность помех, создаваемых подстилающей морской поверхностью может значительно превышать интенсивность собственных шумов, соз-

даваемых входными цепями приемного тракта радиолокационной станции.

Отличительной особенностью помеховых отражений, создаваемых водной поверхностью при ее зондировании импульсным радиолокационным сигналом является наличие регулярной помеховой компоненты – дальномерного регулярного профиля радиолокационных отражений от моря.

При решении ряда задач, требующих повышения качественных показателей радиолокационного обнаружения и координатного сопровождения нескольких протяженных объектов (морских судов с большими габаритами и водоизмещением) существует достаточно много пригодных для практического применения методов и алгоритмов восстановления регулярной компоненты помеховых отражений от подстилающей морской поверхности [2]. Однако выбор того или иного метода и алгоритма обработки помеховых отражений зависит от многих факторов, а именно, текущего пространственно-временного состояния морской поверхности, связанного прежде всего метеорологическими условиями в прилегающей к морской поверхности атмосфере [3].

Цель работы состояла в исследовании и сравнительной оценке эффективности восстановления регулярного дальномерного профиля отражений зондирующего радиолокационного сигнала известными аналитическими методами и алгоритмами с использованием компьютерного моделирования. В процессе выполненных в работе исследований использованы цифровые методы представления обрабатываемых сигналов в виде отсчетов на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) непрерывного сигнала аналогового тракта БРЛС.

## 1. Содержание исследований

### 1.1. Цифровая модель радиолокационного сигнала отраженного от морской поверхности на выходе АЦП

Воспользуемся результатами эвристического синтеза цифровой модели радиолокационных отражений от морской поверхности приведенной в [4], которую будем использовать в дальнейшем для моделирования алгоритмов восстановления регулярно дальномерного профиля.

Цифровая модель отраженного сигнала формируется из упорядоченного набора равноотстоящих отсчетов мощности отраженного от  $i$ -й локальной области поверхности, которая может быть записана следующим образом

$$P_i = \frac{P_u \lambda^2 \sigma_{удi}}{(4\pi)^3 R_i^4} S_i \cdot \sigma_{удi}, \quad (1)$$

где  $P_u$  – мощность излучения БРЛС в импульсе,

$P_i$  – мощность отраженного сигнала от  $i$ -й локальной области поверхности,

$\lambda$  – длина волны излучаемого сигнала,

$R_i$  – дальность между БРЛС и  $i$ -й областью отражения,

$S_i$  – площадь рассеивания  $i$ -й области морской поверхности,

$G$  – коэффициент усиления антенны БРЛС,

$\sigma_{удi}$  – удельная ЭПР  $i$ -й локальной области.

Интенсивность радиолокационных отражений от  $i$ -й области

$$I_i = \frac{P_i}{A},$$

где  $A = G\lambda^2 (4\pi)^{-1}$  – эффективная площадь приемной антенны.

Тогда результирующая интенсивность радиолокационных отражений от морской поверхности будет равна

$$|I(i\Delta D)| = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_i \frac{1}{R_i^4} \left\{ \frac{\bar{\sigma}_i - \tilde{\sigma}_i}{\bar{\sigma}_i} \right\}, \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}_i$  – средняя ЭПР  $i$ -й локальной области поверхности,

$\tilde{\sigma}_i$  – флуктуации  $i$ -й локальной области отражений от морской поверхности,

$N$  – число локальных областей – отсчетов дальности  $R$  между БРЛС и наблюдаемым объектом,

$$\sigma_i = \bar{\sigma}_i - \tilde{\sigma}_i.$$

Выражение (2) представляет собой математическую модель радиолокационных отражений по дальности.

При малых углах скольжения  $S_i$  вычисляется по формуле

$$S_i = \frac{\ell_u R_i \theta_\Gamma}{2}, \quad \theta_\Gamma \ll \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

где  $\ell_u = \frac{c\tau_u}{2}$  – разрешающая способность БРЛС

по дальности,

$\tau_u$  – длительность зондирующего импульса,

$c$  – скорость распространения радиоволн,

$\theta_\Gamma$  – ширина диаграммы направленности антенны БРЛС в горизонтальной плоскости.

Как следует из выражения (2) его можно представить в виде трех сомножителей

$$|I(i \cdot \Delta D)| = A_c \sum_{i=1}^N \psi_{c,i} \xi_{c,i}, \quad (4)$$

где  $A_c$  – постоянная величина, учитывающая технические характеристики радиолокатора,

$\xi_{c,i}$  – флуктуирующий сомножитель, учитывающий относительные флуктуации средней удельной ЭПР морской поверхности в каждой отражающей точке.

Регулярный дальномерный профиль может быть восстановлен по отсчетам интенсивности на выходе АЦП в соответствии с выражением

$$\psi_{c,i} = S_i \bar{\sigma}_i \cdot \frac{1}{R_i^4}. \quad (5)$$

### 1.2. Исследование точности восстановления регулярно дальномерного профиля радиолокационных отражений от протяженной морской поверхности

Одной из прагматических целей разработки цифровой модели (5) являлась возможность ее реализации специальными программными процедурами при компенсации азимутально-дальномерного профиля пассивной помехи от морской поверхности в процессе обнаружения – координатного сопровождения полезного объекта морского судна.

Традиционно такая процедура осуществляется в некогерентных импульсных РЛС на аппаратном, а не на алгоритмическом уровне путем использования временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) тракта усилителя промежуточной частоты РЛС. Схема ВАРУ уменьшает усиление УПЧ на малых дальностях, где обычно не требуется высокая чувствительность. Усиление может изменяться по закону  $R^n$ , где  $n$  выбирается от 2 (для метеофакторов) до 4 (для мешающих отражений от земли и моря). Максимальное усиление достигается на дальности, где мешающие отражения едва превышают уровень шума приемника РЛС. Возможности ВАРУ по поддержанию уровня ложных тревог ограничены. Поскольку начальная настройка ВАРУ производится на какую-то тестовую обстановку ожидаемого уровня от дождя, подстилающей поверхности на различных дальностях, то отклонения от ожидаемых уровней

или воздействие активных источников помех могут привести к нарушению нормальной работы РЛС.

Особенностью работы береговых РЛС является информационный контакт с объектом на малых дальностях, где ВАРУ вообще отключается. При этом устранение перегрузок УПЧ, приводящих к потере сигнала от объекта на малых дальностях осуществляется путем коммутируемого по каскадно-го снижения усиления УПЧ (например, в РЛС «На-яда» использовано четыре последовательно включаемых каскада УПЧ в зависимости от дальности). Таким образом, на малых дальностях, где включен только первый каскад перепад регулярных отражений помехового сигнала от моря и местных предметов может достигать 20 ... 30 дБ. В таких условиях необходимо решать задачу компенсации влияния пассивной помехи на уровне обработки видеосигнала, в том числе и цифровой обработки.

Можно привести еще ряд веских доводов, в том числе и цифровое преобразование радиолокационного сигнала на малом входном уровне, что практически исключает их общей технической структуры тракт УПЧ, видеоусилитель и все связанные с этими устройствами технические проблемы (ВАРУ, АРУ, МАРУ и т.д.). Приведем в качестве примера технические характеристики АЦП submodule широкополосного аналогового ввода ADM212450.

Два канала ввода – 12 бит.

Максимальная частота дискретизации 50 МГц.

Шкалы преобразования  $\pm 10$  В,  $\pm 5$  В,  $\pm 2$  В,  $\pm 0,5$  В,  $\pm 0,25$  В,  $\pm 0,1$  В,  $\pm 0,05$  В.

Рабочая полоса аналогового ввода  $\Delta f \leq 50$  МГц;

SNR=65 дБ при  $F_{ВХ} = 10$  МГц.

Программируемое смещение шкалы:

грубое  $\pm U_{ВХ}$  (256 уровней);

точное  $\pm 0,01 \pm U_{ВХ}$  (256 уровней).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что восстановление регулярной составляющей пассивной помехи на уровне цифровой программной обработки видеосигнала или сигнала промежуточной частоты позволит решать не только задачу устранения самой регулярной помехи, но и другие задачи цифровой обработки радиолокационных сигналов.

### 1.3. Методы восстановления регулярного дальномерного профиля

Приведем краткий обзор методов восстановления регулярного дальномерного профиля радиолокационных отражений от источника пассивной помехи (подстилающей морской поверхности или осадков) по выходным данным АЦП. Сущность решения задачи восстановления регулярного дальномерного профиля (РДП) состоит в следующем. На выходе АЦП поступает аналоговый видеосигнал

(наблюдаемые отражения)  $x_n$ . При этом на выходе АЦП формируется числовой параметр  $n$ , содержащий  $N$  отсчетов на периоде зондирования пространственной структуры источника пассивной помехи.

Через общее число пар выходных числовых значений необходимо провести функцию  $f_x$  так, чтобы можно было задать аналитическую связь между входным и восстановленным выходным сигналом.

В качестве входного сигнала берется аналитическое соотношение (2) для морской поверхности без флуктуирующего множителя  $\xi$ . Выходными считаются те же соотношения, но с учетом зашумленности, которые считаются исходными кривыми  $f_x$ .

При аппроксимации соотношений искомую кривую  $f_x$  необходимо провести через опорные точки  $f(x_n) = y_n$ . Найденная функция дает возможность вычислить выходную функцию  $f_x$  также между опорными точками  $x_n \leq x \leq x_{n+1}$ .

Согласовывать сглаживающую кривую  $f_x$  с парами измерений  $x_n, y_n$  можно различными методами [4].

1. Сумма абсолютных разностей  $|f(x_n) - y_n|$  должна приближаться к минимуму; абсолютная норма минимизируется и происходит линейная  $L_1$  – аппроксимация

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |f(x_n) - y_n| = M_{in}. \quad (6)$$

2. Сумма квадратов разности должна приближаться к минимуму; минимизируется евклидова норма. Этот метод наименьших квадратов Гаусса называется  $L_2$  – аппроксимация

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f(x_n) - y_n)^2 = M_{in}. \quad (7)$$

3. Максимальная разница между сглаживающей кривой и измеренной величиной должна находиться в границах  $D$ ; в случае аппроксимации Чебышева, или  $L_\infty$  – аппроксимации имеет место соотношение

$$\max |f(x) - y_n| \leq D! \quad (8)$$

В дальнейшем будем использовать исключительно метод наименьших квадратов.

## 2. Цифровое сглаживание, дифференцирование и интегрирование

### 2.1. Сглаживание

Флуктуации измеренных величин на выходе АЦП, обусловленные морским волнением и ошибки самого измерительного устройства являются причи-

ной рассеяния измеренных величин  $y_n$ , поэтому перед дальнейшим их использованием, например, при решении задач компенсации регулярного дальномерного профиля.

**2.2. Цифровое дифференцирование**

В ряде случаев необходимо знать наклон измеренных (рассеянных) пар значений, например, когда по измеренной скорости необходимо вычислить ускорение.

**2.3. Численное интегрирование**

Рассмотрим последовательность из N измеренных пар  $(x_n, y_n)$  значений узловых точек:  $x_n$  – расположено на одинаковых отрезках  $x_{n+1} - x_n = h$ .

Необходимо вычислить площадь поверхности, которая ограничена этими парами значений  $(x_n, y_n)$ . Существует несколько способов решения поставленной задачи, называемой в практике цифрового интегрирования правилами, а именно, правило прямоугольника, правило трапеций, правило Кеплера-Симпсона, правило  $\frac{3}{8}$  и т.д. В работе рассматривалась, и моделировалось лишь правило  $\frac{3}{8}$ .

**2.4. Эвристический метод восстановления регулярного дальномерного профиля пространственными окнами**

Эвристический метод сглаживания пространственными окнами основан на нахождении среднего значения с использованием весовых функций, так называемых пространственных окон. Для выделения искомого профиля используется свертка исследуемой последовательности (отраженный сигнал) и весовой функции, которая представляет собой матрицу с единичной площадью, чтобы не вносить изменения в амплитуду сигнала. В простейшем случае это линейная зависимость, что эквивалентно нахождению алгебраического среднего с различным числом членов.

При выполнении компьютерного моделирования были выбраны следующие данные:

**3. Результаты компьютерного моделирования**

При выполнении компьютерного моделирования были выбраны следующие данные:

$P_u = 10^4$ ;

$\tau_u = 0,1 \cdot 10^{-6} \mu S$ ;

$G = 1000$ ;

$\lambda = 3 \text{ см}$ ;

$\bar{\sigma}_{уд} = 40 \text{ дБ}$ ;

$\Delta\tilde{\sigma}_{уд} = 2 \text{ дБ}$  и  $4 \text{ дБ}$ ;

$\Delta D = 15 \text{ м}$  – расстояние между соседними локальными поверхностями (точками отражения);  
 $\theta_\Gamma = 0,5 \text{ град}$ ;

$R_0$  – мертвая зона работы БРЛС;

$\varphi_0$  – угол наклона диаграммы направленности относительно отражающей морской поверхности;

$R_{max} = 5 \text{ км}$  – максимальная дальность между БРЛС и морским судном;

$N = 500$  – количество отсчетов.

Количественные результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Количественные результаты моделирования

№ п/п	Метод восстановления дальномерного профиля	Среднеквадратическое отклонение	
		$\Delta\tilde{\sigma}_{уд} = 2 \text{ дБ}$	$\Delta\tilde{\sigma}_{уд} = 4 \text{ дБ}$
	Необработанные данные	$1,185425 \times 10^{-8}$	$1,421017 \times 10^{-8}$
1	Сглаживание аппроксимирующим полиномом первой степени	$4,025029 \times 10^{-8}$	$4,25161 \times 10^{-8}$
2	Сглаживание аппроксимирующим полиномом второй степени	$3,83303 \times 10^{-8}$	$3,833303 \times 10^{-8}$
3	Сглаживание аппроксимирующим полиномом третьей степени	$4,258709 \times 10^{-8}$	$1,386015 \times 10^{-8}$
4	Определение наклона восстанавливаемого профиля методом цифрового дифференцирования	$1,120521 \times 10^{-7}$	$7,362842 \times 10^{-8}$
5	Интегрирование по правилу 3/8	$1,038543 \times 10^{-7}$	$6,334538 \times 10^{-8}$
6	Сглаживание пространственными прямоугольными окнами N = 3 N = 5 N = 10	$4,599800 \times 10^{-9}$	$1,419712 \times 10^{-8}$
		$6,032574 \times 10^{-9}$	$1,470479 \times 10^{-8}$
		$1,417598 \times 10^{-8}$	$1,762428 \times 10^{-8}$

При цифровом моделировании использовались упрощенные соотношения выражения (4):

– без учета флуктуаций удельной ЭПР

$$|I(i\Delta D)| = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \cdot 10^{\frac{\tilde{\sigma}_{уд}}{10}} \cdot \frac{\theta_\Gamma \sigma_{\tau u}}{2(R_0 + i\Delta D)^3}; \quad (9)$$

– с учетом флуктуаций удельной ЭПР

$$|I(i\Delta D)| = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \cdot 10^{\frac{\tilde{\sigma}_{уд} + \tilde{\sigma}_i}{10}} \cdot \frac{\theta_\Gamma \sigma_{\tau u}}{2(R_0 + i\Delta D)^3}. \quad (10)$$

Модельные флуктуации  $\tilde{\sigma}_i$  для каждого i-го отсчета (10) формировались в виде одномерного быстромменяющегося случайного процесса

$$\sigma_i = |\Delta\tilde{\sigma}| - \text{rnd}(2 / \Delta\tilde{\sigma}), \quad (11)$$

где  $\text{rnd}(\cdot)$  – равномерная выборка случайных чисел с логонормальным распределением [5] в заданном интервале их максимального и минимального значения, и медленно меняющегося одномерного случайного процесса с прореживанием тактовых отсчетов АЦП в 10 раз.

$$\tilde{\sigma}_i = \frac{2}{T+1} \sum_{j=0}^T \sigma_{i+j}, \quad (12)$$

где  $T=10$ ,  $i=0 \dots (N-T)$ ,  $|\Delta\tilde{\sigma}|$  – флуктуации удельной ЭПР в дБ.

Анализ результатов моделирования дает основание констатировать следующее: минимальная величина среднеквадратического отклонения восстановленного профиля от опорного при выбранных значениях  $\sigma_{\text{уд}}$  и  $\Delta\sigma_{\text{уд}}$  достигается сглаживанием цифровых отсчетов (12) полиномом третьего порядка. Однако если эти значения изменить, то минимальная величина среднеквадратического отклонения может быть обеспечена другим методом (полиномом).

Таким образом при решении задачи компенсации регулярного дальномерного профиля отражений от морской поверхности в реальных условиях функционирования БРЛС предпочтение следует отдать его восстановлению из реальных данных АЦП.

### Заклучение

В настоящей статье сформулирована и исследована задача восстановления регулярного дальномерного профиля помеховых отражений от морской поверхности по данным аналого-цифрового преобразования пространственно-временного процесса отражений, имеющих место на выходе береговой радиолокационной станции.

На основе применения известных цифровых аналитических методов восстановления (сглажива-

ния) оценена точность восстановления регулярного профиля. Сделан вывод о том, что изменение исходных данных аналого-цифрового преобразования не дает альтернативного преимущества любого из исследованных методов.

Необходимо использовать реальные данные при функционировании БРЛС в конкретных условиях метеобстановки и выбирать и применять тот метод, который дает наилучшие результаты, т.е. осуществлять дискретную адаптацию к изменяющемуся состоянию отражающей морской поверхности.

### Список литературы

1. Кравченко, А.И. *Общие принципы системного описания и реализации автоматизированных радиотехнических систем информационной поддержки служб регулирования движения судов в прибрежных морских регионах [Текст] / А.И. Кравченко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 2 (50). – С. 14 – 17.*
2. Бабак, В.П. *Обробка сигналів [Текст] / В.П. Бабак, В.С. Хандекичій, Е. Шрюгер. – К.: Либідь, 1999. – 496 с.*
3. Красюк, Н.П. *Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС [Текст] / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.*
4. Печенин, В.В. *Цифровая модель радиолокационного сигнала рассеянного подстилающей морской поверхностью под малым углом рассеяния. [Текст] / В.В. Печенин, Е.П. Мсаллам, А.В. Усиченко // Вестник национального технического университета «ХПИ» – 2004. – № 36. – С. 100–104.*
5. Кулемин, Г.П. *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами [Текст] / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наукова думка, 1987. – 233 с.*

Поступила в редколлегию 22.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, с.н.с. В.В. Павликов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ РЕГУЛЯРНОГО ДАЛЕКОМІРНО ПРОФІЛЮ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ ВІД ПРОТЯЖНОЇ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ

В.В. Печенін, К.О. Щербина, О.І. Кравченко, Є.П. Мсаллам, М.А. Вонсович

*На основі цифрової моделі радіолокаційних віддзеркалень від морської поверхні і відомих аналітичних методів і супутніх їм алгоритмів згладжування флуктуаційної компоненти цифрової моделі виконано порівняльний аналіз точності відновлення регулярного далекомірною профілю віддзеркалень. Результати досліджень дають підставу зробити висновки про те, що реальні умови функціонування радіолокаційних засобів виявлення морських судів супроводу не дають переваги жодному з методів відновлення. Отже, необхідні програмні процедури відновлення регулярного профілю по всім методам і тільки тоді вибирати кращий з них.*

**Ключові слова:** відображення, дальність, супроводження, далекомірний профіль, виявлення, інтенсивність.

### THE COMPARATIVE ACCURACY ANALYSIS OF REGULAR RANGING RADAR SEA ECHO REFLECTANCE PROFILE RECOVERY

V.V. Pechenin, K.A. Scherbina, A.I. Kravchenko, E.P. Msallam, M.A. Vonsovich

*The comparative accuracy analysis of regular ranging reflectance profile recovery has been conducted basing on radar sea echo digital model and common analytical methods with associated smoothing algorithms of the fluctuating component of the digital model. The research results provide grounds to conclude that neither of the recovery methods can be perfectly applied in the real functioning conditions of radar ship detection and tracking aids. Thus, program recovery procedures of regular profile for all methods are required with the consequent choice of the best one.*

**Keywords:** reflection, range, tracking, ranging profile, detection, intensity.