



УДК 621.391:621.396

Е. А. Милащенко  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
АО «ОКБ "Новатор"»  
А. А. Язовский  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

## Амплитудное подавление негауссовских морских помех в некогерентном полосовом тракте приемника

*Рассмотрен метод нелинейного амплитудного подавления радиолокационных помех от морской поверхности в некогерентном полосовом тракте приемника. Использована наиболее адекватная модель негауссовской радиолокационной помехи от взволнованной морской поверхности, основанная на К-распределении плотности вероятности огибающей помехи. В модели помех учтен внутренний гауссовский шум приемника. Получены амплитудные характеристики нелинейного элемента и зависимости коэффициента подавления от отношения "помеха/шум" для различных значений параметров модели помехи.*

### Морские помехи, нелинейная фильтрация, К-распределение, гауссовские помехи, негауссовские помехи

Для исследования и анализа характеристик радиолокационных станций (РЛС), работающих в условиях взволнованной морской поверхности, необходимы адекватные модели радиолокационных морских отражений. Распространенные модели, основанные на понятии гауссовского "белого" шума [1], могут быть точными лишь в определенных условиях. Они описывают структуру отражений только при работе радара в режиме низкого разрешения.

В последние десятилетия XX в. были обнаружены явления, возникающие при работе РЛС в режимах высокого разрешения и при низких углах скольжения [1], вследствие чего были предложены негауссовские модели помех. Негауссовский характер радиолокационных морских отражений при высоком разрешении радара и низких углах скольжения существенно осложняет процесс обнаружения морских целей с малой эффективной поверхностью рассеяния. Следовательно, при оценке характеристик обнаружения радаров, основное предназначение которых заключается в обнаружении объектов, располагающихся на морской поверхности или на ее фоне, необходимо учитывать негауссовость морских отражений. Такие

модели помех описаны в [1], [2], где показано, что наиболее полное статистическое описание огибающей радиолокационных отражений от морской поверхности дается К-распределением.

В настоящей статье исследование эффективности амплитудного подавления мешающих отражений от морской поверхности проведено с учетом внутреннего гауссовского шума приемника. Поскольку в реальном приемнике всегда присутствует тепловой гауссовский шум, учет его действия в модели распределения огибающей помехи позволяет оценить реальный выигрыш от применения оптимальной нелинейной обработки.

**Математическая модель К-распределения радиолокационных помех от морской поверхности.** Плотность вероятности огибающей аддитивной смеси К-помехи с гауссовским шумом  $E$  известна [1]:

$$p(E) = \frac{2Eb^{\nu}}{\Gamma(\nu)} \int_0^{\infty} \frac{x^{\nu-1} \exp(-bx)}{x + P_{III}} \times \exp\left[-E^2/(x + P_{III})\right] dx, \quad (1)$$

где  $b$  – параметр "шкалы", имеющий размерность, обратную мощности;  $\Gamma(v)$  – гамма-функция;  $P_{\text{ш}}$  – мощность внутреннего гауссовского шума приемника. Величина  $v$  определяется условиями наблюдения и параметрами локатора [2] из следующего уравнения:

$$\log_{10}(v) = \frac{2}{3} \log_{10}(\Phi) + \frac{5}{8} \log_{10}(\rho) - K - \frac{\cos(2\theta)}{3} + \log_{10}\left(\frac{\tau_{\text{и}}}{30}\right) \log_{10}\left(\frac{50}{\Phi}\right) \log_{10}(5.5\Phi)^{0.8},$$

где  $\Phi$  – угол скольжения, ...°;  $\rho$ ,  $m$  – разрешение РЛС по дальности;  $K$  – параметр, зависящий от вида поляризации (1.39 при вертикальной и 2.09 при горизонтальной поляризациях);  $\theta$  – угол между направлением луча РЛС и направлением морской ряби, рад;  $\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса, нс.

Мощность помехи с распределением огибающей (1) определяется параметрами  $v$  и  $b$  [1]:

$$P_{\text{п}} = 0.5 M\{E^2\} = 0.5v/b = \alpha P_{\text{ш}},$$

где  $M\{\cdot\}$  – символ математического ожидания;  $\alpha = P_{\text{п}}/P_{\text{ш}}$  – отношение мощности помехи к мощности шума.

**Амплитудное подавление помех в некогерентном полосовом тракте приемника.** Одним из распространенных методов борьбы с негауссовскими помехами в таком тракте является защита приемника с помощью безынерционного нелинейного преобразования огибающей смеси сигнала и помехи [3].

Замена обычного квадратичного преобразования другим нелинейным преобразованием  $h(E)$  увеличивает отношение "сигнал/помеха" в  $\mu$  раз [3]:

$$\mu = P_{E^2} \frac{[M\{h'(E)/E + h''(E)\}]^2}{M\{h^2(E)\}}, \quad (2)$$

где  $P_{E^2}$  – мощность флюктуаций квадрата огибающей помехи;  $h'(E)$ ,  $h''(E)$  – первая и вторая производные функции  $h(E)$  соответственно.

Максимум коэффициента подавления  $\mu$  достигается при оптимальной амплитудной характеристике (АХ)  $h_0(E)$ , связанной с плотностью вероятностей  $p(E)$  огибающей помехи выражением

$$h_0(E) = \frac{p''(E)}{p(E)} - \frac{p'(E)E - p(E)E'}{p(E)E^2}. \quad (3)$$

Определить вид оптимальной АХ и рассчитать максимальный коэффициент подавления поме-

хи непосредственно по (2) и (3) невозможно из-за разрыва функции (3) в нуле.

Для получения оценок максимального коэффициента подавления помех с распределением (1) введем параметрическую модель нелинейного преобразования  $h(E)$  в виде обобщенного полинома:

$$h(E) = \sum_{k=0}^m a_k \varphi_k(E), \quad (4)$$

где  $a_k$  – параметры настройки нелинейного преобразователя;  $\varphi_k(E)$  – базисные функции;  $m$  – порядок полинома.

Определив входящие в (2) математические ожидания, имеем:

$$\begin{aligned} M\{h^2(E)\} &= \sum_{k=0}^m \sum_{v=0}^m a_k a_v M\{\varphi_k(E)\varphi_v(E)\} = \mathbf{a}^T R \mathbf{a}; \\ M\{h'(E)/E + h''(E)\} &= \\ &= \sum_{k=0}^m a_k M\{\varphi_k'(E)/E + \varphi_k''(E)\} = \mathbf{a}^T \mathbf{b}, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{a} = (a_0 \ a_1 \ \dots \ a_m)^T$  – вектор-строка с параметрами настройки нелинейного преобразователя;  $\mathbf{b} = (b_0 \ b_1 \ \dots \ b_m)^T$  – вектор-строка с элементами  $b_k = M\{\varphi_k'(E)/E + \varphi_k''(E)\}$ ;  $R$  – симметрическая положительно определенная матрица с элементами  $r_{kv} = M\{\varphi_k(E)\varphi_v(E)\}$ .

Тогда коэффициент подавления может быть представлен в виде [4]

$$\mu = P_{E^2} (\mathbf{a}^T \mathbf{b})^2 / (\mathbf{a}^T R \mathbf{a}).$$

Максимум  $\mu$  достигается при оптимальных значениях параметров АХ (4):

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{opt}} = \lambda R^{-1} \mathbf{b}, \quad \lambda \neq 0 \quad (5)$$

и определяется следующим образом:

$$\mu_{\text{max}} = P_{E^2} \mathbf{b}^T R^{-1} \mathbf{b}. \quad (6)$$

Ограничимся аппроксимацией оптимальной АХ в виде степенного полинома:  $\varphi_k(E) = E^k$ . Данная аппроксимация позволяет охватить такие частные случаи, как линейный и квадратичный детекторы, а также детекторы более высоких порядков. Подставив  $\varphi_k(E) = E^k$  в (4), из (5) и (6) получим выражения для оптимальных параметров настройки нелинейного преобразователя и

максимального коэффициента подавления через начальные моменты огибающей.

**Методика расчетов.** Расчеты проводились в среде MathCAD для модели (1) при  $\rho = 15$  м, вертикальной поляризации излучения РЛС,  $\theta = 0$ ,  $\tau_{и} = 100$  нс,  $b = 0.5$  для трех значений параметра  $\nu = 0.5, 1.0$  и  $1.5$ , соответствующих углам скольжения  $\Phi = 1, 2.2$  и  $5^\circ$ . Расчеты проведены для значений  $\alpha$ , равных 0, 10, 20, 30 и 40 дБ. Для каждого значения  $\alpha$  строилась зависимость  $h(E)$  и рассчитывался коэффициент подавления  $\mu$ .

**Результаты исследования.** На рис. 1 представлены плотности вероятности значений огибающей (1) для  $\nu = 0.5$  и различных отношениях "помеха/шум"  $\alpha$ , равных 0, 10, 20 и 30 дБ. Отдельная кривая построена для  $P_{ш} = 0$  (без учета внутреннего шума).

Рис. 1 показывает существенное отличие плотности вероятностей значений огибающей (1) от закона Рэлея ( $\alpha = 0$ ) уже при  $\alpha \geq 10$  дБ. Необходимо отметить, что при больших значениях  $\alpha$  значение плотности вероятности значений огибающей (1) в нуле равно нулю в отличие от традиционной модели морских отражений в виде К-распределения огибающей (кривая для  $P_{ш} = 0$ ).

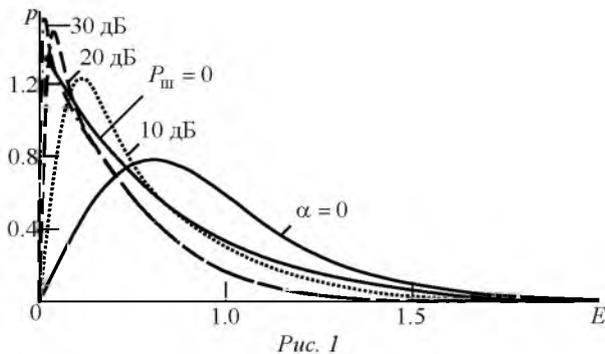


Рис. 1

На рис. 2 представлены амплитудные характеристики  $h(E)$  при оптимальных коэффициентах степенного полинома различной степени  $m$  для  $\alpha = 30$  дБ и  $\nu = 0.5$ . Кривая для  $m = 1$  соответствует полигональному виду АХ, для  $m = 2$  – квадратичному, для  $m = 3$  – кубическому.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента подавления  $\mu(\alpha)$  при аппроксимации оптимальной АХ полиномом 9-го порядка.

В таблице приведены значения коэффициента подавления  $\mu$  для различных значений порядка  $m$  аппроксимирующего полинома, различных отношений "помеха/шум"  $\alpha$  и углов скольжения  $\Phi$ .

В настоящей статье рассмотрен метод нелинейного амплитудного подавления радиолокационных

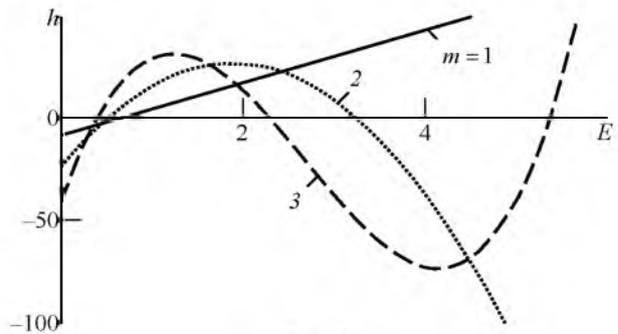


Рис. 2

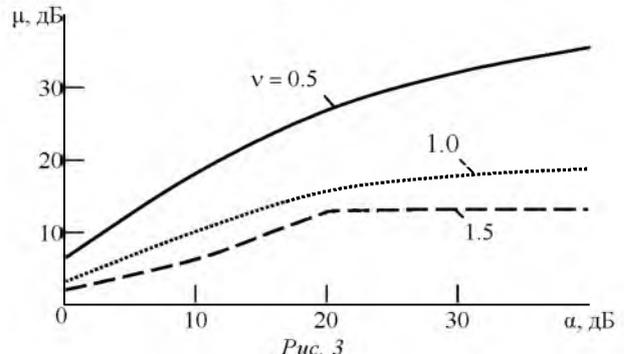


Рис. 3

$\Phi = 1^\circ, \nu = 0.5$									
$\alpha$ , дБ	$m$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu$ , дБ									
0	3.98	5.701	6.048	6.07	6.082	6.131	6.19	6.234	6.258
10	8.397	12.321	14.501	15.89	16.81	17.407	17.809	18.074	18.209
20	11.661	16.505	19.488	21.631	23.274	24.544	25.592	26.488	27.151
30	14.142	19.513	22.909	25.405	27.365	28.918	30.231	31.388	32.282
40	16.093	21.799	25.443	28.145	30.284	31.922	33.446	34.738	35.75
$\Phi = 2.2^\circ, \nu = 1.0$									
$\alpha$ , дБ	$m$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu$ , дБ									
0	2.291	3.067	3.103	3.115	3.153	3.181	3.193	3.196	3.196
10	4.987	7.59	8.841	9.532	9.914	10.119	10.23	10.285	10.315
20	6.188	9.471	11.389	12.726	13.71	14.455	15.069	15.557	15.832
30	6.626	10.149	12.307	13.884	15.104	16.074	16.916	17.628	18.055
40	6.772	1.376	12.616	14.276	15.578	16.627	17.549	18.341	18.826

$\Phi = 5^\circ, \nu = 1.5$									
$\alpha, \text{дБ}$	$m$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\mu, \text{дБ}$								
0	1.554	1.907	1.907	1.936	1.96	1.968	1.97	1.97	1.97
10	3.469	5.164	5.798	6.066	6.175	6.217	6.231	6.233	6.234
20	4.057	6.176	7.204	7.751	7.902	7.906	8.114	8.767	12.899
30	4.174	6.377	7.494	8.128	8.33	8.33	8.534	9.228	13.159
40	4.192	6.409	7.541	8.19	8.401	8.401	8.604	9.305	13.234

помех от взволнованной морской поверхности в некогерентном полосовом тракте приемника. Использована наиболее адекватная модель помеховых радиолокационных отражений от взволнованной морской поверхности, учитывающая тепловой шум приемника. Установлено, что непосредственный расчет коэффициента подавления помехи в рамках принятой модели невозможен в связи с расходимостью (2) при нулевом значении огибающей помехи. В связи с этим для оценки эффективности подавления помех амплитудная характеристика подавителя аппроксимирована степенным полиномом.

Получены зависимости коэффициента подавления от отношения "помеха/шум" для различных значений параметров модели помехи при аппроксимации оптимальной амплитудной характеристики нелинейного преобразования огибающей степенным полиномом от первого до девятого порядка, по которым можно определить, что выигрыш в помехоустойчивости может достигать 30 дБ и более.

Полученные результаты могут служить основой построения адаптивных нелинейных устройств подавления радиолокационных помех от взволнованной морской поверхности в некогерентном полосовом тракте приемника.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ward K, Tough R., Watts S. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance. 2<sup>nd</sup> ed. Croydon: CPI Group Ltd, 2013. 586 p.  
 2. Antipov I. Simulation of sea clutter returns. Salisbury: DSTO Electronic and surveillance research laboratory. 1998. 71 p. URL: <http://digext6.defence.gov.au/dspace/bitstream/1947/4132/1/DSTO-TR-0679%20PR.pdf> (дата обращения 02.10.2016).

3. Бакут П. А., Акимов П. С. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.

4. Валеев В. Г., Язовский А. А. Адаптивные нелинейные преобразователи для подавления негауссовских помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1987. Т. 30, № 8. С. 62–64.

E. A. Milashchenko

Ural Federal University n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin,  
 JSC «Special design bureau "Novator"»

A. A. Yazovsky

Ural Federal University n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin

#### Amplitude suppression of nongaussian sea clutter in a noncoherent bandpass path of the receiver

*The method of non-linear amplitude suppression of radar clutter from a sea surface in a noncoherent band path of the receiver is considered. The model of the most adequate nongaussian a radar clutter from the rough sea surface which envelope is based on K-distribution of density of probability is used. In model of noises it is considered internal gaussian receiver noise. For various values of parameters of model of clutter amplitude characteristics of a non-linear element and dependence of coefficient of suppression on the relation a clutter/noise are under construction.*

Sea clutter, non-linear filtering, K-distribution, Gaussian clutter, nongaussian clutter

Статья поступила в редакцию 16 марта 2016 г.