

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДАЛЬНОМЕРНОГО ПРОФИЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

д.т.н., проф. В.В. Печенин, Е.П. Мсаллам

На основе цифровой модели радиолокационных отражений после аналого-цифрового преобразователя и использовании цифровых методов сглаживания решена задача восстановления дальномерного профиля радиолокационных отражений по данным АЦП. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения точностных характеристик радиолокационных станций (РЛС).

Постановка проблемы. Дальнейшее развитие и совершенствование радиолокационных средств обнаружения и сопровождения различных объектов, при их движении вблизи подстилающей или непосредственно на самой подстилающей поверхности, связано, прежде всего, с поиском эффективных методов и алгоритмов подавления помеховых отражений, именуемых пассивными помехами.

Практическим примером существенного влияния пассивных помех от подстилающей поверхности является обнаружение – сопровождение морских и речных судов, движущихся по водной поверхности, различных транспортных объектов, движущихся на земной поверхности, летательных аппаратов различного назначения, движущихся вблизи земной поверхности.

В настоящее время для достижения целевых задач обеспечения требуемых характеристик обнаружения-сопровождения многих целей широкое применение находят обзорные импульсные радиолокационные станции с цифровой обработкой наблюдаемых сигналов. Среди них важное место занимают береговые радиолокационные станции (БРЛС), обеспечивающие получение необходимой информации о параметрах движения и местоположении морских судов в стесненных условиях мореплавания. При этом интенсивность пассивных помех, создаваемых водной поверхностью может значительно превышать интенсивность собственных шумов БРЛС. Отличительной особенностью помеховых отражений от водной поверхности является наличие регулярной компоненты – дальномерного регулярного профиля радиолокационных отражений.

При решении ряда задач повышения эффективности радиолокацион-

ного обнаружении-сопровождении многих целей существует альтернатива выбора различных методов и алгоритмов восстановления регулярной компоненты помеховых отражений от подстилающей поверхности.

Цель работы состояла в сопоставительной оценке эффективности восстановления регулярной компоненты пассивной помехи известными аналитическими методами и алгоритмами, с использованием математического моделирования на ЭВМ.

В настоящей работе исследуются некоторые известные аналитические методы восстановления регулярного дальномерного профиля радиолокационных отражений от водной поверхности на основе использования отчетов наблюдаемого видеосигнала на выходе аналого-цифрового преобразования (АЦП).

Цифровая модель радиолокационных отражений от морской поверхности на выходе АЦП. Основываясь на результатах эвристического синтеза цифровой модели радиолокационных отражений от морской поверхности, описанной в работе [1], приведем основные аналитические соотношения, используемые в дальнейшем для моделирования на ЭВМ. Для малых углов скольжения диаграммы направленности БРЛС относительно водной поверхности $\varphi \ll \pi/2$ площадь локальной рассеивающей области S_{M_i} на i -й дальности может быть вычислена в соответствии с приводимым соотношением

$$S_{M_k} \cong l_u R_k \theta_\Gamma / 2, \quad (1)$$

где $l_u = \sigma_{\tau_u} / 2$ – разрешающая способность БРЛС по дальности; R_k – дальность между БРЛС и k -й локальной областью радиолокационного рассеивания; θ_Γ – ширина диаграммы направленности БРЛС в азимутальной плоскости.

В общем случае цифровая модель радиолокационных отражений от морской поверхности представима в виде трех сомножителей

$$\{I(k\Delta l_u)\}_{\theta=\text{const}} = A_c \sum_k \psi_{c,k} \xi_{c,k}, \quad (2)$$

где A_c – постоянная величина, учитывающая технические характеристики БРЛС; $\psi_{c,k} = S_{M_k} \sigma_{удм} / R_k^3$ – функция, описывающая регулярный дальномерный профиль, подлежащий восстановлению; θ – фиксированный азимут; $\xi_{c,k} = ((\sigma_{удм} - \sigma_{удм_k}) / \sigma_{удм})$ – флуктуирующий сомножитель, учитывающий флуктуации средней удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности $\sigma_{удм}$; $\Delta\sigma_{удм_k}$ – среднеквадратическое отклонение $\sigma_{удм}$ от k -й локальной области радиолокационного рассея-

ния, обусловленное морским волнением.

Методы восстановления регулярного дальномерного профиля радиолокационных отражений по выходным данным АЦП. Общая постановка задачи восстановления регулярного дальномерного профиля (РДП) сводится к следующему [2]. На вход АЦП поступает видеосигнал (наблюдаемые отражения) X_n . При этом на выходе АЦП числовой параметр n пробегает точки от 1 до N . 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) без флуктуирующего множителя $\xi_{с.к.}$, которое считается опорным.

Выходным берется аналитическое соотношение (2), которое отображает уровень зашумленности опорного сигнала флуктуационными эффектами рассеяния. При аппроксимации соотношения (2) 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.

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

$$\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N |f(x_n) - y_n| = M_{in}. \quad (3)$$

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

$$\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (f(x_n) - y_n)^2 = M_{in}. \quad (4)$$

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

$$\max |f(x) - y_n| \leq D!. \quad (5)$$

В дальнейшем будем использовать исключительно метод наименьших квадратов, который по сравнению с минимизацией абсолютной нормы удобнее для использования.

Цифровое сглаживание, дифференцирование и интегрирование.

1. *Сглаживание.* Флуктуации измеренных величин на выходе АЦП,

обусловленные морским волнением, и ошибки самого измерительного устройства являются причиной рассеяния измеренных величин y_n , поэтому перед дальнейшим их использованием, например при решении задач компенсации регулярного дальномерного профиля, их необходимо сглаживать, т.е. усреднить. Наиболее простым способом сглаживания является вычисление сглаженной величины через три точки y_{n-1} , y_n , y_{n+1} :

$$\bar{y}_n = \frac{y_{n-1} + y_n + y_{n+1}}{3}, \quad (6)$$

при этом результат сглаживания (x_n, \bar{y}_n) находится в точке, показанной на рис. 1.

Для сглаживания измеренных величин можно пользоваться аппроксимирующими полиномами не выше 3-го порядка. В общем случае сглаживающий полином $P(x)$ будет иметь вид:

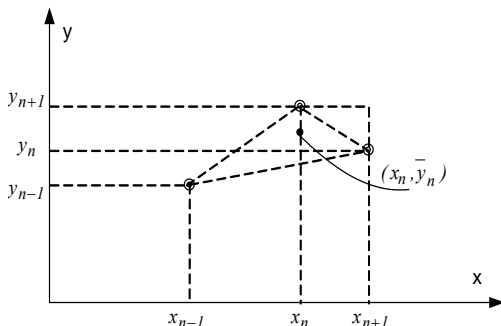


Рис. 1. Сглаживание по трем точкам

$$P(x) = a + bx + cx^2 + dx^3, \quad (7)$$

где a , b , c , d – коэффициенты полинома.

Для аргумента x_n значение полинома – $P(x_n)$. Оно в общем случае отличается от измеренной величины y_n . Разница ординат, расстояние или остаток r_n записываются в виде:

$$r_n = P(x_n - y_n); \quad P(x_n) - y_n - r_n = 0. \quad (8)$$

Для $1 \leq n \leq N$ имеем N пар измерений. В соответствии с методом наименьших квадратов Гаусса сумма S квадратов остатков или расстояний должна быть минимальной с помощью весовой функции $W(s_n)$. В этом случае

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N W(x_n) (P(x_n) - y_n)^2 = M_{in}. \quad (9)$$

Сумма S квадратов расстояний является функцией искомых коэффициентов полинома $S = S(a, b, c, d)$. Сумма S имеет экстремум в точке, где частные производные от коэффициентов равны нулю:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial S}{\partial d} = 0. \quad (10)$$

Этот экстремум является минимумом, поскольку матрица других производных от коэффициентов всегда положительна. Тем самым из началь-

ной формулы (10) образуются четыре уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial S}{\partial a} &= \sum_{n=1}^N 2(a + bx_n + cx_n^2 + dx_n^3 - y_n) \cdot 1 = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= \sum_{n=1}^N 2(a + bx_n + cx_n^2 + dx_n^3 - y_n) \cdot x_n = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial c} &= \sum_{n=1}^N 2(a + bx_n + cx_n^2 + dx_n^3 - y_n) \cdot x_n^2 = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial d} &= \sum_{n=1}^N 2(a + bx_n + cx_n^2 + dx_n^3 - y_n) \cdot x_n^3 = 0.\end{aligned}\quad (11)$$

Раскрывая скобки и перенося y_n вправо, получим систему нормальных уравнений:

$$aN + b \sum_{n=1}^N x_n + c \sum_{n=1}^N x_n^2 + d \sum_{n=1}^N x_n^3 = \sum_{n=1}^N y_n; \quad (12.1)$$

$$a \sum_{n=1}^N x_n + b \sum_{n=1}^N x_n^2 + c \sum_{n=1}^N x_n^3 + d \sum_{n=1}^N x_n^4 = \sum_{n=1}^N x_n y_n; \quad (12.2)$$

$$a \sum_{n=1}^N x_n^2 + b \sum_{n=1}^N x_n^3 + c \sum_{n=1}^N x_n^4 + d \sum_{n=1}^N x_n^5 = \sum_{n=1}^N x_n^2 y_n; \quad (12.3)$$

$$a \sum_{n=1}^N x_n^3 + b \sum_{n=1}^N x_n^4 + c \sum_{n=1}^N x_n^5 + d \sum_{n=1}^N x_n^6 = \sum_{n=1}^N x_n^3 y_n. \quad (12.4)$$

Каждый раз суммы определяются при $n=1 \dots N$. Их можно вычислить из заданной пары значений. Коэффициенты a, b, c, d неизвестны. Для их определения нужно решить систему уравнений (12).

2. *Цифровое дифференцирование.* В ряде случаев необходимо знать наклон измеренных (рассеянных) пар значений, например, когда по измеренной скорости необходимо вычислить ускорение. Решить этот вопрос можно двумя способами.

Первый способ состоит в вычислении разностного отношения. Если измеренные величины y_n в зависимости от параметра x_n получены эквидистантно через отрезки $x_{n+1} - x_n = h$, то при разложении в ряд Тейлора

$$y_{n+1} = y_n + hy'_n; \quad y_{n-1} = y_n - h'y'_n \quad (13)$$

можно найти алгоритм вычисления производной

$$y'_n = \frac{y_{n+1} - y_{n-1}}{2h}, \quad (14)$$

что является разностным отношением смежных по отношению к (x_n, y_n)

узловых точек.

В соответствии с уравнением (7) рассмотрим методику определения наклона полинома третьего порядка через пять точек. Если дифференцировать этот полином по x_{n+k} то получим

$$P'(x_{n+k}) = b + 2c(x_{n+k} - x_n) + 3d(x_{n+k} - x_n)^2. \quad (15)$$

Для аргумента x_n при $k=0$ разница исчезает. Определим коэффициент b , который удовлетворяет наклону полинома при аргументе x_n . Это значение берется как сглаживающий наклон y'_n :

$$P'(x_n) = b = y'_n. \quad (16)$$

Для определения конкретного значения величины y'_n нормальные уравнения (12.2, 12.4).

Каждый раз сумма берется от $k=-2$ до $k=2$. Расстояния от оси x должны быть эквидистанты $x_{n+k} - x_n = kh$. В зависимости от индекса k они будут иметь такие значения:

$$\begin{aligned} k = -2; \quad x_{-2} = x_{n-2} - x_n = -2h; \quad k = -1; \quad x_{-1} = x_{n-1} - x_n = -h; \\ k = 0; \quad x_0 = x_n - x_n = 0; \end{aligned} \quad (17)$$

$$k = 1; \quad x_1 = x_{n+1} - x_n = h; \quad k = 2; \quad x_2 = x_{n+2} - x_n = 2h,$$

т.е. можно вычислить искомый коэффициент b (наклон y'_n) по формуле

$$b = \bar{y}'_n = \frac{1}{12h} (y_{n-2} - 8y_{n-1} + 8y_{n+1} - y_{n+2}). \quad (18)$$

Для оставшихся узловых точек, через которые проходит сглаживающий полином, также можно вычислить наклоны \bar{y}'_{n-2} , \bar{y}'_{n-1} , \bar{y}'_{n+1} , \bar{y}'_{n+2} :

$$\bar{y}'_{n-2} = \frac{1}{84h} (-125y_{n-2} - 136y_{n-1} + 48y_n - 88y_{n+1} + 29y_{n+2}); \quad (19.1)$$

$$\bar{y}'_{n-1} = \frac{1}{84h} (-38y_{n-2} - 2y_{n-1} + 24y_n + 26y_{n+1} - 10y_{n+2}); \quad (19.2)$$

$$\bar{y}'_{n+1} = \frac{1}{84h} (10y_{n-2} - 26y_{n-1} - 24y_n + 2y_{n+1} + 38y_{n+2}); \quad (19.3)$$

$$\bar{y}'_{n+2} = \frac{1}{84h} (-29y_{n-2} + 88y_{n-1} - 48y_n - 13y_{n+1} + 125y_{n+2}). \quad (19.4)$$

Вторая производная по аргументу X_n определяется соотношением

$$\bar{y}''_n = \frac{1}{12h^2} (-y_{n-2} + 16y_{n-1} - 30y_n + 16y_{n+1} - y_{n+2}). \quad (20)$$

Рассеянные измеренные значения не рекомендуется сглаживать с помощью полиномов больше третьего порядка, поскольку полином выше третьего порядка является причиной пульсаций, приводящей к значительному отклонению сглаживающего полинома от измеренного дей-

ствительного разностью отношения.

3. *Цифровое интегрирование.* Рассмотрим последовательность из N измеренных (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, называемых в практике цифрового интегрирования правилами [3], а именно, правило прямоугольника, правило трапеций, правило Кеплера-Симпсона, правило 3/8 и т.д. Ввиду ограниченности объема статьи в работе рассматривалось и исследовалось лишь правило 3/8. В соответствии с данным правилом и стратегией полиномиального сглаживания проведем полином третьего порядка через четыре узловые точки (рис. 2).

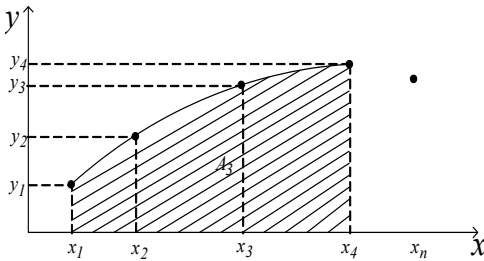


Рис. 2. Правило 3/8

Площадь A_3 состоит из трех полос и вычисляется следующим образом:

$$A_3 = 3h \frac{y_1 + 3y_2 + 3y_3 + y_4}{8} \quad (21)$$

Оценка среднеквадратического отклонения площади A_3 , вычисленной по флуктуирующим отсчетам $(x_i, y_i) \quad i=1 \dots 4$ относительно площади A_3 , вычисленной по не флуктуирующим отсчетам, осуществляет методом наименьших квадратов согласно формуле (4).

4. *Эвристический метод восстановления регулярного дальномерного профиля пространственными окнами.* Эвристический метод сглаживания пространственными окнами основан на нахождении среднего значения с использованием весовых функций (рис. 3), так называемых пространственных окон.

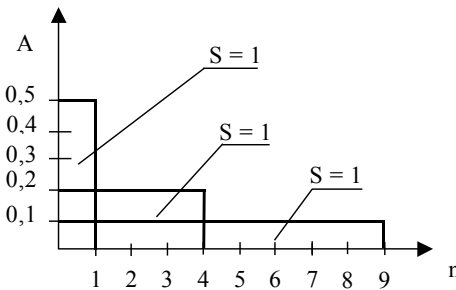


Рис. 3. Весовая функция

Для выделения искомого профиля используется свертка исследуемой последовательности (отраженный сигнал от подстилающей поверхности) 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 ал-

гебраического среднего с различным числом членов

$$P_i = \sum_{j=0}^N S_i F_{i+j}, \quad (22)$$

где P_i – результат обработки пространственными окнами; S_i – весовая функция с единичной площадью; F_{i+j} – исследуемая последовательность.

В качестве весовых функций можно использовать любую последовательность с произвольным количеством членов. Например: показательную, степенную, гауссовскую, тригонометрическую и даже произвольную эвристическую функцию.

Эффективность использования той или последовательности можно оценить с помощью среднеквадратического отклонения. Как показали экспериментальные исследования, достаточно трудно, даже можно сказать практически невозможно, отыскать такую весовую функцию, которая давала бы минимальное СКО для всех видов исследуемых последовательностей. Для каждого конкретного случая необходимо находить свою весовую функцию.

Результаты машинного моделирования на ЭВМ. Для оценки качества и точности восстановления регулярного дальномерного профиля радиолокационного отражения от взволнованной морской поверхности, выполняется машинный эксперимент на основе цифрового моделирования выражения (2), представленного в виде отсчетов интенсивности сигнала на выходе АЦП радиолокатора

$$\{I(k\Delta u)\}_{\theta=\text{const}} = \frac{P_{\text{м.к}}}{A} = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \sum_k \Psi_{\text{с.к}} \xi_{\text{с.к}}, \quad (23)$$

где $\Psi_{\text{с.к}} = \frac{\theta_{\Gamma} \sigma_{\text{удм}}}{(R_0 + R_k)^3 \cdot \pi^2} \cdot G \cdot \frac{\sigma_u}{2}$ – восстанавливаемый регулярный про-

филь (опорные значения); $A = G\lambda^2/4\pi$ – эффективная площадь антенны

БРЛС; $\xi_{\text{с.к}} = \frac{(\sigma_{\text{удм}} - \Delta\sigma_{\text{удмк}})}{\sigma_{\text{удм}}}$ – флуктуирующий множитель.

При расчетах приняты следующие обозначения: $P_u = 10^4$ Вт – мощность излучения в импульсе; $\tau_u = 0,1 \cdot 10^{-6}$ $\mu\text{С}$ – длительность импульса; $G = 1000$ – коэффициент усиления антенны; $\lambda = 3$ см – длина волны; $\sigma_{\text{удм}} = -40$ дБ – удельная ЭПР морской поверхности; $\overline{\Delta\sigma}_{\text{удм}} = 2$ дБ – максимальный размах флуктуаций ЭПР; $\Delta R = 15$ м – расстояние между двумя соседними локальными источниками рассеяния; $\theta_{\Gamma} = 0,5$ град – ши-

рина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости; $R_0 = 300$ м – мертвая зона работы БРЛС; $\varphi_0 = 1$ град – угол наклона диаграммы направленности относительно взволнованной морской поверхности; $c = 3 \cdot 10^5$ км – скорость распространения радиоволн в вакууме; $R_{\max} = 5$ км – максимальная дальность; $N = 500$ – количество отсчетов.

Результаты моделирования приведены в табл. 1, из анализа которой следует, что минимальная величина среднеквадратического отклонения при выбранных значениях $\sigma_{\text{удм}}$ и $\bar{\Delta}\sigma_{\text{удмк}}$ обеспечивается сглаживанием цифровых отсчетов полиномом третьего порядка. Однако при этом необходимо отметить, что при изменении размаха флуктуаций $\bar{\Delta}\sigma_{\text{удмк}}$ и скорости его изменения модулируемых в виде дискретных отсчетов временного Гауссовского процесса, минимальная величина среднеквадратического отклонения может быть обеспечена другим полиномом.

Таблица 1

Результаты моделирования

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

Заключение. В настоящей статье рассмотрена и исследована задача восстановления дальномерного профиля радиолокационных отражений от подстилающей морской поверхности по данным аналого-цифрового преобразования. На основе использования известных цифровых аналитических методов восстановления (сглаживания), а именно, полиномиального сглаживания, цифрового дифференцирования, цифрового интегрирования и

сглаживания пространственными окнами проведены экспериментальные исследования точности восстановления регулярного дальномерного профиля радиолокационных отражений от подстилающей морской поверхности.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при оценке влияния условий распространения радиолокационных сигналов рассеянных различными подстилающими поверхностями, тестировании цифровых трактов обработки сигналов в различных системах, функционирующих в условиях влияния рассмотренных помех, оценки качества и точности различных цифровых алгоритмов обнаружения-сопровождения многих надводных и околоземных радиолокационных целей, как протяженных, так и точечных, оценки качества подавления пассивных помех от подстилающей поверхности цифровыми методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Печенин В.В., Мсаллам Е.П., Усиченко А.В. Цифровая модель радиолокационного сигнала, рассеянного подстилающей водной поверхностью под малым углом скольжения // Вестник НТУ «ХПИ». Системный анализ, управление и информационные технологии. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 36. – С. 100 – 104.
2. Бабак В.П., Хандецкий В.С., Шрюгер Е. Обробка сигналів – К.: Либідь, 1999. – 496 с.
3. Штагер Э. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизованных сигналов / Под. ред. В.П. Бабака. – К.: Лебедь, 1995. – 240 с.
4. Schrüfer E. Signalverarbeitung. München; Wien: Carl Hanser Verlag, 1990. – 186 s.
5. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
6. Гончаренко А.А., Кравченко В.Ф., Пономарев В.И. Дистанционное зондирование неоднородных сред. – М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
7. Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
8. Смит Джон М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров-исследователей. – М.: Машиностроение, 1980. – 265 с.

Поступила 27.09.2004

ПЕЧЕНИН Валерий Васильевич, д-р техн. наук, проф. каф. проектирования РЭС ЛА Национального аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». В 1966 году окончил ХАИ. Области научных интересов – теория и техника радиотехнических систем распространения радиоволн, высококачественная аудиотехника, специальные вопросы радиоэлектроники.

МСАЛЛАМ Екатерина Петровна, аспирантка каф. проектирования РЭС ЛА Национального аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», который окончила в 2002 году. Области научных интересов – теоретические и экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в земной атмосфере, цифровая обработка сигналов, прикладные вопросы радиолокации.

