

УДК 621.396.96:621.371.3.

**Е.П. МСАЛЛАМ, В.В. ПЕЧЕНИН**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ЭВРИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, РАССЕЯННОГО СОВОКУПНОСТЬЮ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Рассмотрены общие принципы эвристического синтеза цифровых моделей радиолокационного сигнала, отраженного от протяженных объектов. В модели учтено влияние основных мешающих факторов: подстилающей морской поверхности и гидрометеообразований. Получены модели реальных радиолокационных сигналов, обладающие компактной аналитической формой и удобные для практического использования. В модель заложено минимальное количество радиофизических параметров.

**радиолокационный сигнал, подстилающая морская поверхность, гидрометеообразования, пассивные помехи, радиолокационные отражения, протяженные объекты, модель локальных источников**

### **Введение**

Практическая ситуация наблюдения и обработки радиолокационных сигналов, рассеянных совокупностью протяженных объектов имеет место при решении задачи обнаружения – сопровождения (например) потока морских объектов (судов) при их движении в стесненных условиях мореплавания.

Наблюдаемый на входе радиолокатора сигнал в общем случае представляет собой сложную суперпозицию радиолокационных отражений, создаваемых морскими судами, подстилающей морской поверхностью, гидрометеообразованиями и другими источниками пассивных помех.

Достижение требуемых характеристик обнаружения – сопровождения полезных объектов (судов), обеспечивающих контроль и регулирование движения судопотока, обеспечивается береговыми радиолокационными станциями (БРЛС) с цифровой обработкой сигнала.

Как показал анализ литературных источников [1 – 3], имеется много полезных сведений, описывающих радиофизические свойства и статистическую структуру радиолокационных отражений от подстилающей морской поверхности, гидрометеообразований, пассивных помех и других протяженных объектов.

### **1. Формулирование проблемы**

В настоящей работе решена задача эвристического синтеза цифровой модели радиолокационного сигнала как совокупности отражений от всех элементов суперпозиции, которая на сегодняшний день является актуальной.

#### **1.1. Синтез цифровой модели радиолокационного сигнала для произвольного объекта суперпозиции радиолокационных отражений**

Эвристический синтез цифровой модели основан на очевидном факте, заключающемся в том, что физическая природа радиолокационных отражений от протяженных объектов, входящих в наблюдаемую структуру сигнала на входе БРЛС, одинакова.

Как показано в [1], все объекты, относящиеся к классу протяженных, представляют собой с геометрической точки зрения сложную конфигурацию. Там же на основе многочисленных экспериментальных данных предложена модель рассеяния поверхностей сложной топологической формы, именуемая моделью локальных источников.

Согласно модели локальных источников протяженный объект, облучаемый сигналом РЛС, формирует рассеянное поле локальными поверхностями на объекте, размеры которых много меньше расстоя-

ний между ними, а сами расстояния находятся в пределах сотен длин волн облучаемого СВЧ-поля.

При синтезе модели предполагалось, что радиолокатор обладает высокой разрешающей способностью по дальности; любой из радиолокационных объектов (судно, морская поверхность, гидрометеорообразования) обладает слабой динамикой перемещения, что справедливо для судов с большим водоизмещением; азимут излучения постоянен; технические характеристики БРЛС известны.

Выберем в качестве рассеивающего объекта горизонтальную поверхность, обладающую свойствами локального рассеяния. Для описания радиолокационного рассеяния используем методы геометрической оптики;  $\alpha = \arcsin h/R_i \ll \frac{\pi}{2}$  – угол скольжения;  $h$  – высота антенны РЛС над земной поверхностью;  $R_i$  – расстояние между  $i$ -м локальным источником и РЛС.

Угловое положение локальных зон рассеяния может быть произвольным.

При этом относительная удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) определяется как

$$\sigma_i = \frac{\sigma_0 - |\Delta\sigma_i|}{\sigma_0}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – максимальная удельная ЭПР локального источника рассеяния, поверхность которого перпендикулярна направлению облучения;  $|\Delta\sigma_i|$  – модуль флуктуаций удельной ЭПР, которые обусловлены расположением поверхности локального источника, отличным от нормального по отношению к направлению излучения.

Запишем условие соответствия модели рассеяния принятой модели как

$$\frac{D_{ij}}{\lambda} = k > 100 \dots 500,$$

где  $D_{ij}$  – расстояние между соседними локальными областями рассеяния объекта;  $\lambda$  – длина волны излучения. Описанная на радиофизическом уровне

модель радиолокационного рассеяния принадлежит к классу моделей многолучевого канала [6].

Подадим на вход такого канала короткий радиоимпульс. Каждая локальная область поверхности рассеяния создает на выходе канала последовательность неперекрывающихся во времени импульсов с задержкой  $\Delta t_i$  и доплеровским сдвигом  $\Delta\omega_i$ . В данном случае для малой динамики движения  $\Delta\omega_i \approx 0$ . В общем случае сигнал, поступающий на вход приемника РЛС, равен

$$U(t - \tau_u) = \sum_i U_i(t - \tau_u) = \sum_i \alpha_i X(t - \Delta t_i - \tau_u) \exp[j\omega(t - \Delta t_i - \tau_u)]. \quad (2)$$

где  $\alpha_i = \alpha_i(\Delta t_i - \tau_u)$  – комплексный коэффициент, модуль которого пропорционален интенсивности сигнала, прошедшего  $i$ -м путем, а фаза – сдвигу фазы на частоте  $\omega$ ;  $X(t - \Delta t_i - \tau_u)$  – комплексная величина, учитывающая амплитуду и фазу сигнала.

Соотношение (2) соответствует случаю, когда  $\Delta t_i \gg \tau_u$ . Сигнал на входе приемника, не вносящий искажений в наблюдаемый сигнал, можно представить (по огибающей) так:

$$|\bar{U}(t - \Delta t_i - \tau_u)| = A_s \sum_i \psi_{ci}(\Delta t_i) [\sigma_i(\Delta t_i)], \quad (3)$$

где  $A_s$  – величина амплитуды зондирующего сигнала;  $\psi_c(\Delta t_i)$  – функция огибающей выходных импульсов в точках  $\Delta t_i$ ;  $\sigma_{i_0}(\Delta t_i)$  – относительная удельная ЭПР  $i$ -го локального источника.

Реализация (3) выходного сигнала канала при  $\sigma_i = \sigma_0$ ,  $\Delta t_i = \Delta t_0$  показана на рис. 1.

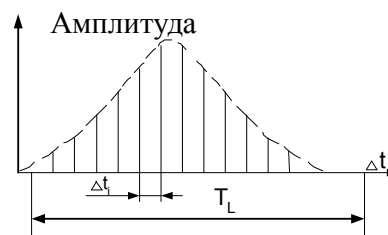


Рис. 1. Сигнал на выходе приемника

Для нормированного соотношения (3) получим

$$U_H = \frac{|\bar{U}(t - \tau_u)|}{A_s} = \sum_i \psi_c(\Delta t_i) \sigma_i(\Delta t_i). \quad (4)$$

Структурно-физическая модель канала с рассеянием, удовлетворяющая выражению (3), представлена на рис. 2.

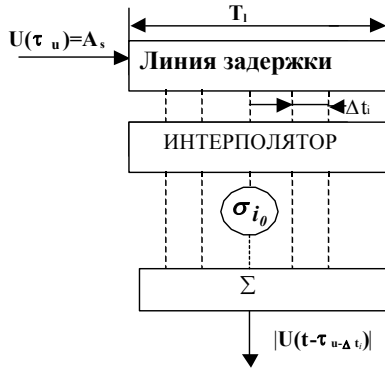


Рис. 2. Структурно-физическая модель канала

В соответствии с рис. 2 на вход структурно-физической модели поступает видеоимпульс, длительность которого много меньше  $\Delta t_i$ , на выходе линии задержки образуется последовательность импульсов  $\tau_u$ , отстоящих друг от друга на величину  $\Delta t_i$ . Интерpolator осуществляет регулярную весовую обработку в соответствии с заданной функцией  $\psi_c(\Delta t_i)$ . Далее вводятся флуктуации задержанных импульсов в соответствии с заданным законом распределения величины  $\Delta \sigma_i$ . На выходе сумматора формируется последовательность импульсов, которая с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) представляется в виде чисел. При этом тактовая частота опроса АЦП выбирается из условия

$$F_T = \frac{1}{\Delta t_i}, \text{ а } \Delta t_i = \Delta t_0 = \frac{D_0}{c}; \quad D_{ij} = D_0; \quad c - \text{ скорость распространения радиоволн.}$$

Отметим некоторые особенности синтезированной цифровой модели радиолокационного сигнала.

Прежде всего полученный результат является идеализацией реальной ситуации, когда модель рассеяния неизвестна; выполнение условия  $\Delta t_i \gg \tau_u$

не очевидно. Так, например, при  $D_{ij} = 100\lambda$ ;

$$\lambda = 3 \text{ см, величина } \Delta t_i = \frac{3_m}{3 \cdot 10^8_m} = 10^{-8} = 0,01 \mu S.$$

Тогда длительность импульса  $\tau_u = 0,001 \mu S$ , что обеспечивает получение неперекрывающейся последовательности выходных импульсов. В настоящее время не существует РЛС, излучающих импульсы длительностью  $0,001 \mu S$ .

Вместе с тем полезный результат очевиден. Он состоит в том, что в реальной ситуации мы получаем перекрывающуюся последовательность отраженных от протяженной поверхности импульсов, т.е. длительность принятого сигнала больше длительности зондирующего, а его амплитуда флуктуирует. Степень флуктуаций существенным образом будет зависеть от временной области перекрытия соседних радиоимпульсов и фазовых соотношений высокочастотного заполнения.

Далее, синтезированная модель (3), (4) представляет собой произведение регулярной функции, флуктуирующей функции и постоянного коэффициента (амплитуды или интенсивности), взятых в фиксированных точках. На практике это означает, что такие фиксированные точки определяются тактовой частотой АЦП.

Аналитическое описание постоянного коэффициента определяется параметрами РЛС. Регулярная функция на аналитическом уровне определяется затуханиями отраженного сигнала в зависимости от дальности до отражающих областей поверхности объекта. Флуктуирующая функция определяется изменениями динамики движения поверхности и ее колебаниями в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

## 1.2. Синтез цифровой модели радиолокационного сигнала, рассеянного полезным объектом наблюдения

Выберем в качестве исходного соотношения для синтеза требуемой модели, эквивалентного

уравнению (3), классическое уравнение радиолокации для точечной цели (объекта):

$$P_u = \frac{P_u G_2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R_0^4} \sigma_u, \quad (5)$$

где  $P_u$  – мощность сигнала, отраженного целью;  $P_u$  – мощность излученного сигнала в импульсе;  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $R_0$  – расстояние между РЛС и точечной целью;  $\sigma_u$  – ЭПР цели.

Интенсивность сигнала на входе РЛС, создаваемая точечной целью, определится как

$$I = \frac{P_u}{A} = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \cdot \frac{1}{R_0^4} \sigma_u, \quad (6)$$

где  $A = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$  – эффективная площадь антенны РЛС на прием.

Тогда для протяженного по дальности полезного объекта при фиксированном азимуте, в частности морского судна, отсчеты АЦП определяются как

$$|U(i\Delta t_i)|_0 = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \sum_i \frac{\sigma_{u_i}}{R_i^4} \cdot \left( \frac{\sigma_{u_0} - |\Delta\sigma_{u_i}|_i}{\sigma_{u_0}} \right). \quad (7)$$

Здесь  $\frac{P_u G}{(4\pi)^2}$  – постоянный коэффициент;  $\frac{\sigma_{u_i}}{R_i^4}$

– регулярная функция;  $\frac{\sigma_{u_0} - |\Delta\sigma_{u_i}|}{\sigma_{u_0}}$  – флуктуирующая функция;  $\sigma_{u_0}$  – удельная ЭПР локального источника рассеяния на объекте;  $\Delta\sigma_{u_i}$  – модуль флуктуаций удельной ЭПР, обусловленный качаниями судна в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $R_i$  – расстояние до  $i$ -й локальной области рассеяния.

### 1.3. Синтез цифровой модели радиолокационного сигнала, рассеянного морской поверхностью

Основой синтеза, как и в предыдущем случае, выбирается уравнение (5), подходящее для протяженной морской поверхности в уравнение (7).

Здесь ЭПР цели заменяется на эквивалентный ей параметр облучения  $S_M$ , который определяется площадкой подстилающей поверхности, одновременно облучаемой РЛС. При этом величина  $S_M$  определяется в соответствии с формулой

$$S_M = \frac{l_u R \theta_\Gamma}{2 \cos \alpha}. \quad (8)$$

Здесь  $l_u = \frac{c\tau_u}{2}$  – элемент разрешения по дальности;  $R$  – расстояние между РЛС и центром облучаемой площадки;  $\theta_\Gamma$  – ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Для  $\alpha \ll \pi/2$ ,  $\cos \alpha = 1$  получим  $S_M = \frac{c\tau_u}{4} \theta_\Gamma R$ .

В пределах этой площадки располагаются локальные источники рассеивания. Тогда в соответствии с выражением (7) можно записать

$$|U(i\Delta t_i)|_M = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \sum_i \frac{c\tau_u \theta_\Gamma R_i}{R_i^4} \left( \frac{\sigma_{уд.м} - |\Delta\sigma_{уд.м}|_i}{\sigma_{уд.м}} \right), \quad (9)$$

где  $\sigma_{уд.м}$  – удельная ЭПР морской поверхности;  $|\Delta\sigma_{уд.м}|_i$  – флуктуации удельной ЭПР, обусловленной параметрами морского волнения.

Экспериментальные данные для  $\sigma_{уд.м}$  и ее флуктуаций приведены, например, в [6].

### 1.4. Синтез цифровой модели радиолокационного сигнала, рассеянного гидрометеообразованиями

Среди большого разнообразия видов гидрометеообразований наиболее изученными являются дождевые осадки.

Особенность дождевых осадков состоит в том, что они принадлежат к объемно-распределенным рассеивающим объектам. В силу этого определение ЭПР такого вида гидрометеообразований представляет известные трудности [7]. Задача решается со следующими допущениями: расстояние между двумя ближайшими соседними частицами гидрометео-

образования, рассеивающими электромагнитное поле, много больше их размера и длины волны; среда (область) с рассеивающими частицами оптически прозрачна. Полное решение задачи приведено в [8]. Воспользуемся приведенным в [9] выражением для средней мощности сигнала, рассеянного гидрометеобразованием (объемом):

$$P_{\partial} = \frac{P_u \pi^5 A l_u}{32 \lambda^4} \cdot 0,93 \cdot 200 I_{\partial}^{1,6} \cdot \frac{1}{R^2}, \quad (10)$$

где  $I_{\partial}$  – средняя интенсивность осадков в разрешающем объеме.

Интенсивность рассеянного осадками сигнала для  $i$ -го разрешающего объема будет равна

$$I_{\partial_i} = \frac{\overline{P_{\partial}}}{A} = \frac{P_u \pi^5 c \tau_u}{64 \lambda^4} \cdot 0,93 \cdot 200 I_{\partial}^{1,6} \cdot \frac{1}{R_i^2}, \quad (11)$$

где  $R_i$  – расстояние между РЛС и  $i$ -м разрешающим объемом. Тогда

$$\begin{aligned} |U(i\Delta t_i)|_{\partial} &= \frac{P_u \cdot 0,93 \cdot 200 \pi^5}{64} \sum_i \frac{I_{\partial}^{1,6}}{\lambda^4 R_i^2} \times \\ &\times \left( \frac{\sigma_{y\partial.d} - |\Delta\sigma_{y\partial.d}|_i}{\sigma_{y\partial.d}} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\sigma_{y\partial.d}$  – удельная ЭПР рассеяния осадков;

$|\Delta\sigma_{y\partial.d}|_i$  – флуктуации удельной ЭПР.

### 1.5. Синтез цифровой модели радиолокационного сигнала, рассеянного полезным объектом и подстилающей морской поверхностью

Выберем в качестве аналога полезного объекта морское судно, движущееся по водной поверхности. Полагаем, что рассеяние сигнала, отражаемого от судна, осуществляется только его бортовой частью с геометрическими размерами:  $h$  – длина;  $b$  – высота борта. Тогда геометрическое сочленение «борт – подстилающая поверхность» можно рассматривать как угловой отражатель (рис. 3).

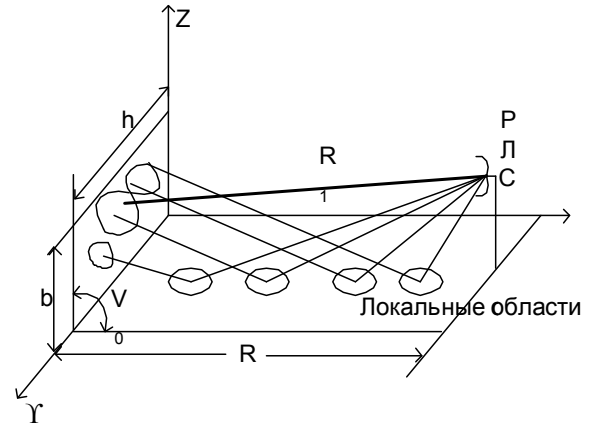


Рис. 3. Структура геометрического сочленения «судно – море»

Если  $R \gg b, h$ , то задача получения модели проста. Объект по отношению к РЛС является точечной целью, и синтезируемая цифровая модель определяется как

$$\begin{aligned} |U(i\Delta t_i)|_{0.m} &= \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \cdot \frac{1}{R^4} \sigma_{\psi} + \\ &+ \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \sum_i \frac{c \tau_u \theta_{\Gamma} R_0}{R_i^4} \left( \frac{\sigma_{y\partial.m} - |\Delta\sigma_{y\partial.m}|_i}{\sigma_{y\partial.m}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь  $R_0 = R/2$ , а  $\sigma_{\psi} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \alpha^2 b^2 \cos^2 \theta$ ;

$\theta$  – угловое положение борта относительно оси  $\gamma$ .

Предполагается, что качания борта отсутствуют. В общем случае ЭПР углового отражателя вычисляется очень сложно. Поэтому воспользуемся готовым результатом, приведенным в [1]:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_{\psi}} &= \frac{\pi R^2 h}{\gamma_0 \lambda} S_{\text{ЭК}}(\theta) \times \\ &\times \left[ 1 + \frac{1}{\pi k h \gamma_0} \frac{\cos(2\pi k h \gamma_0)}{\pi k h \gamma_0} + \frac{2 \text{Si}(2h\gamma_0)}{\pi} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $k$  – волновое число;  $\gamma_0$  – угловое направление падающих волн,  $\gamma_0 \neq 0$ ;  $\text{Si}(\cdot)$  – интегральный синус. Функция  $S_{\text{ЭК}}(\theta)$  задается графически, некоторые из этих графиков приведены в работе [9].

Используя уравнения (7) с учетом (14), получим

$$|U(i\Delta t_i)|_{0.m} = \frac{P_u G}{(4\pi)^2} \sum_i \frac{\overline{\sigma_{\psi}}}{R_i^4} \left( \frac{\sigma_{y\partial.m} \pm |\Delta\sigma_{y\partial.m}|_i}{\sigma_{y\partial.m}} \right). \quad (15)$$

## 2. Решение проблемы

В результате проведенных в работе исследований методом эвристического синтеза получены цифровые модели радиолокационных отражений от подстилающей поверхности, гидрометеообразований, полезных объектов и их совокупности.

### Заключение

В настоящей статье изложены общие принципы эвристического синтеза цифровых моделей радиолокационного сигнала, рассеянного протяженными объектами.

Получены компактные аналитические соотношения, удобные для практического использования при разработке радиолокационных систем, функционирующих в присутствии радиолокационных отражений от подстилающей морской поверхности и гидрометеообразований. При этом количество радиофизических характеристик сведено к минимуму. Достаточно использовать экспериментальные данные по величинам удельных ЭПР и их флуктуациям. Анализ полученных соотношений показывает, что выбор конкретной модели рассеяния электромагнитных волн – локальных источников или фацетной – несуществен.

### Литература

1. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 184.
2. Кулемин Г.П., Разказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. – К.: Наук. думка, 1987. – С. 232.
3. Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 216.
4. Судовые радиолокационные станции / Под ред. А.М. Байрашевского. – М.: Транспорт, 1977. – С. 352.

5. Кулемин Г.П. Обратное рассеяние сантиметровых и миллиметровых радиоволн земной поверхностью при малых углах скольжения / Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 17 – 28.

6. Кирилов Н.Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. – М.: Связь, 1971.

7. Красюк Н.П., Розенберг В.И. Корабельная радиолокация и метрология. – Л.: Судостроение, 1970. – С. 328.

8. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1975. – С. 244.

9. Скольник М. Введение в технику радиолокационных систем. – М.: Мир, 1965. – С. 746.

10. Андрианов В.А., Ветров В.И., Ракитин Б.В. Определение текущих условий распространения в пограничном слое атмосферы // Тез. докл. XII Всесоюз. конф. по РРВ. – М. – 1978. – Ч. 2. – С. 13 – 16.

11. Брылев Г.Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 231 с.

12. Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С. Радиолокация морской поверхности. 1978. – 144 с.

13. Добровольский Д.Д., Ланде Б.Ш. Об интерпретации результатов радиолокационного зондирования морской поверхности при малых углах скольжения // Пятый Всесоюз. семинар: Докл. – М.: ГОИН. – 1986. – С. 94 – 96.

*Поступила в редакцию 29.03.04*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, Северо-восточный филиал НПО «Природа», г. Харьков