

В. И. Луценко, И. В. Луценко, С. А. Масалов, С. И. Хоменко
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЛОЖЕННЫХ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ И ПОЛЕЙ

Рассмотрена возможность использования вложенных полумарковских процессов для создания статистических моделей сигналов, отраженных от поверхностей раздела (суши и моря), а также участков «ясного» неба. На основе экспериментальных данных определены входящие в их состав параметры. Показано, что нестационарность сезонного изменения коэффициента преломления тропосферы может быть учтена путем описания его статистик полигауссовыми моделями. Экспериментально получены параметры модели для каждого из сезонов года. Предложенный подход может использоваться для создания имитационной модели поведения коэффициента преломления с использованием вложенных полумарковских процессов. Ил. 6. Табл. 3. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: нестационарные сигналы и процессы, обратное рассеяние, коэффициент преломления, вложенные процессы, финитные функции.

При высоком разрешении по дальности и угловым координатам наблюдаются существенные отклонения законов распределения флуктуаций, отраженных подстилающими поверхностями и «ясным» небом сигналов от стандартных [1, 2]. Это обусловлено последовательным и раздельным наблюдением участков поверхности с отличающимися статистическими свойствами неровностей, порождающими нестационарность и негауссовость рассеянного сигнала, а также участков атмосферы с существенно отличающимися от стандартных значениями коэффициента преломления [1, 2]. Исторически для учета негауссовости статистик рассеянного сигнала использовались модели, обеспечивающие получение заданной статистики путем использования нелинейного безынерционного преобразования случайного процесса с гауссовым законом распределения [3]. Таким образом, были предложены для мгновенных значений и

амплитуд отражений от моря при размерах пространственного элемента разрешения радиолокационной системы (РЛС), меньших среднего периода морских волн [4] модели составного нормального и логарифмически нормального законов распределения. Получаемые при этом процессы имели существенно отличную от гауссова процесса статистику распределения, однако являлись стационарными. Была разработана и теория оптимального приема сигналов на фоне квазистационарных негауссовых шумов [3]. Вместе с тем для реальных сигналов, отраженных от морской поверхности, участков суши, покрытых растительностью, «ясного» неба характерна существенная нестационарность характеристик рассеянного сигнала по пространственным координатам и во времени, что связано с пространственно-временной изменчивостью отражающих свойств местности и неба (рис. 1).

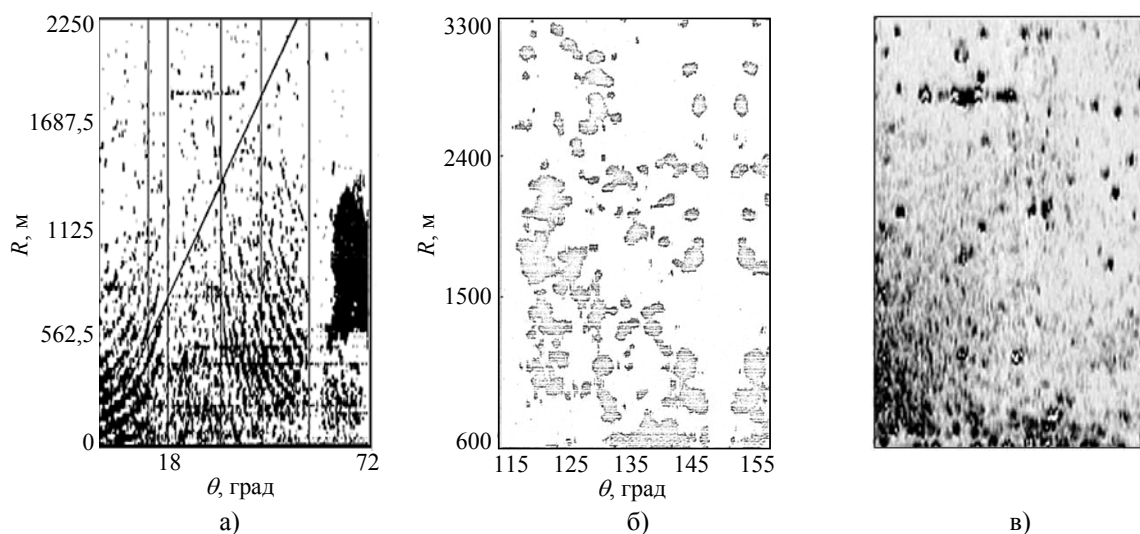


Рис. 1. Радиолокационные изображения: а) – морской поверхности, волна 3 см; б) – суши, волна 2 см; в) – «ясного» неба, волна 4 см; дальность 5...15 км; пиксель 60 м

Видно, что при всем различии рассеивающих объектов для сигналов характерны некоторые общие особенности. Все они являются пространственно нестационарными процессами. Зачерненные участки интенсивного отражения чередуются со светлыми участками малой интенсивности рассеянного сигнала. Для моря зачерненные участки связаны с прохождением через элемент разрешения гребня морской волны или ее разрушением вследствие потери устойчивости. Для суши – у зачерненных участков локальный угол облучения таков, что обеспечиваются условия переотражения сигнала в сторону РЛС. Для участков отражения на небе характерны существенно отличающиеся от соседних участков значения коэффициента преломления воздуха, что и приводит к отражению от их границы раздела. Для учета нестационарности пробовали использовать параметрические модели [5]. Для моря используется двухмасштабная модель морской поверхности в виде неровностей с резонансными размерами, расположенными на крупной волне [6]. Это приводит к необходимости использования переменной во времени рэлеевской модели. При этом вычислительные процедуры достаточно громоздки и не позволяют без привлечения численных расчетов проследить трансформацию закона распределения и спектра рассеянного сигнала при изменении характеристик радиотехнических систем (РТС). Использование вложенных дискретно-непрерывных полумарковских процессов позволяет создавать статистические модели, лишённые этого недостатка [1, 2, 7, 8].

1. Математическая формулировка модели. Статистическое описание основано на использовании вложенных двухкомпонентных случайных процессов $\{\overrightarrow{S}(t), \theta(t)\}$, у которых одна компонента $\overrightarrow{S}(t)$ непрерывна, другая $\theta(t) = \nu_i$ дискретна, а t – обобщенная координата, в качестве которой могут выступать время и пространственные координаты. Эти компоненты являются зависимыми и, в общем случае, не марковскими. Это означает, что не накладывается никаких ограничений на распределение времен существования процесса в каждом из фазовых состояний. В каждый момент времени процесс находится в одном из K возможных фазовых состояний $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$, причем полагается известным начальное состояние $\theta_0 = \nu_i$ в момент времени $t = 0$ и одношаговые вероятности перехода π_{ij} , где $i, j = \overline{1 \dots K}$. Сопоставим каждому ненулевому элементу π_{ij} матрицы вероятности перехода случайную величину T_{ij} с плотностью распределения $f_{ij}(t)$, которую будем

называть временем ожидания в состоянии ν_i до перехода в состояние ν_j . Если величины T_{ij} распределены по экспоненциальному закону, то такой процесс будет марковским. На практике во многих случаях такое предположение не выполняется, в частности, для отражений от суши, и тогда процесс, у которого смена состояний описывается марковской цепью, а плотность распределения времен существования в каждом из них отличается от экспоненциальной, относится к классу полумарковских. Внутри каждого из ν_i состояний процесс будем полагать квазистационарным, который описывают своей статистической матрицей рас-

сеяния $[S_i(t)] = \begin{bmatrix} s_{11i}(t) & s_{12i}(t) \\ s_{21i}(t) & s_{22i}(t) \end{bmatrix}$, плотностью рас-

пределения значений $[P_i(s)] = \begin{bmatrix} P_{11i}(s) & P_{12i}(s) \\ P_{21i}(s) & P_{22i}(s) \end{bmatrix}$ и

спектром $[S_i(\omega)] = \begin{bmatrix} s_{11i}(\omega) & s_{12i}(\omega) \\ s_{21i}(\omega) & s_{22i}(\omega) \end{bmatrix}$. Это означа-

ет, что статистическая матрица рассеяния процесса $\|S(t)\|$ и матрица плотностей распределения значений $\|P(S)\|$ и спектров $\|S(\omega)\|$ для учета поляризационных особенностей рассеяния являются блочными векторами – каждый элемент i вектора является квадратной матрицей 2×2 . Для описания процесса внутри фазового состояния в ряде случаев могут быть использованы стандартные модели гауссовых процессов. Однако лучшие результаты могут дать финитные функции [9–11]. Для этого есть ряд физических предпосылок. Так, интенсивность рассеянного морем сигнала определяется крутизной крупной ветровой волны, которая не может быть бесконечно большой. Начиная с некоторой крутизны, волны теряют гидродинамическую устойчивость и разрушаются. Аналогичным образом для суши. Даже при нормальном падении на поверхности, например стены домов или скалы, существуют предельные значения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Для участков «ясного» неба рассеяние создается перепадами коэффициента преломления на границах этих участков. Они также имеют ограниченную величину. Значения коэффициентов преломления тропосферы определяются значениями температуры, давления и влажности и поэтому также финитны.

Для оценки рабочих характеристик РТС, работающих в условиях помех от местности и отражений от «ясного» неба, необходимо знание статистических характеристик помех, описываемых рассмотренной моделью на интервале наблюдения РЛС элемента разрешения (t_0, t_0+t) , где t – может быть временем накопления информации

с элемента разрешения. Решение задачи определения аналитического выражения для спектра $S(\omega)$ и плотности распределения значений $P(\lambda)$ при произвольном времени наблюдения t представляет значительные трудности.

Частные случаи ее решения получены в теории восстановления для марковских процессов [12]. Однако для двух предельных случаев: малых, $t \ll T_{ij}$, и больших, $t \gg \sum \pi_{ij} T_{ij}$, $i, j \in (l, k)$ времен наблюдения по сравнению со средним временем существования процесса в i фазовом состоянии до перехода в j результаты становятся очевидными. При малых временах наблюдения практически не происходит смена фазового состояния процесса за время наблюдения элемента разрешения и плотность распределения значений процесса, его спектр и все числовые характеристики соответствуют его начальному состоянию:

$$P(\lambda) = P_i(\lambda); S(\omega) = S_i(\omega). \quad (1)$$

Если выбор начальной точки t_0 несущественен, то эти характеристики реализуются с вероятностями, соответствующими финальным вероятностям каждого из состояний P_i . При больших временах наблюдения плотность распределения значений, спектр и все числовые характеристики процесса определяются как средневзвешенные характеристики в каждом из фазовых состояний с весами, определяемыми финальными вероятностями их наличия P_i :

$$\begin{aligned} P(\lambda) &= \sum_{i=1}^k P_i(\lambda) P_i, \\ S(\omega) &= \sum_{i=1}^k S_i(\omega) P_i, \\ \sigma^2 &= \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 P_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\{\sigma_i^2, S_i(\omega), P_i(\lambda)\}, \{\sigma^2, S(\omega), P(\lambda)\}$ – дисперсия, спектр, плотность распределения процесса в i фазовом состоянии и в целом.

2. Описание радиолокационных (РЛ) отражений от моря. Экспериментальное изучение пространственно-временных характеристик отражений проведено с использованием импульсных РЛС с длинами волн 3 и 2 см, 8 и 4 мм. Пример РЛ-изображения участка морской поверхности на волне 3 см приведен на рис. 1, а. Прослеживается пространственная периодичность, связанная с периодом морских волн. На рис. 2 в масштабах, линеаризующих экспоненциальный закон распределения, приведены распределения средних длительностей выбросов отражений и пауз на волнах сантиметрового (см) 3 см и миллиметрового (мм) 8 мм диапазонов, полученные при горизонтальной поляризации (ГП) излучения–приема и разных значениях порога принятия решения Π относительно среднего значения помехи \bar{A} .

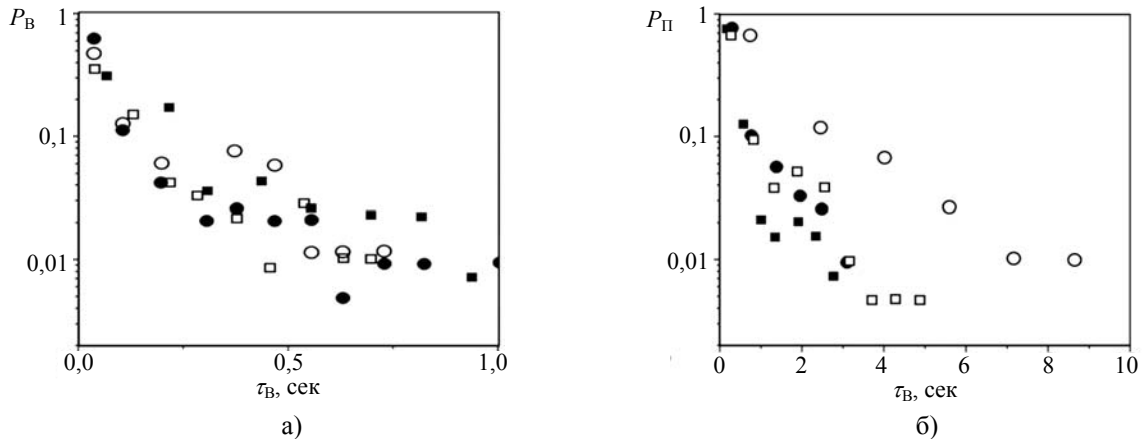


Рис. 2. Гистограммы распределения длительностей: а) – всплесков, б) – пауз; $\psi = 5$ мрад, $U = 7$ м/с, волнение 3 балла: $\lambda = 3,2$ см; ГП: \bullet – $\Pi = 1,5\bar{A}$, \circ – $\Pi = 2,0\bar{A}$; $\lambda = 8$ мм; ГП: \blacksquare – $\Pi = 1,5\bar{A}$, \square – $\Pi = 2,0\bar{A}$

Следует отметить отсутствие существенной разницы между этими характеристиками в разных диапазонах волн.

Это обусловлено тем, что на них в первую очередь влияют параметры морского волнения и угол облучения поверхности в вертикальной плоскости ψ . Начальные участки распределения

удовлетворительно описываются экспоненциальным законом распределения, однако начиная с уровней обеспеченности менее 10 % имеют больший уровень «хвостов», чем экспоненциальное распределение. Среднее значение длительности «выбросов» отражений моря имеет величину в десятые доли секунды, в то время как средняя

длительность пауз достигает единиц секунд и соизмерима со средним периодом морских волн.

В табл. 1 приведены вероятностные характеристики выбросов по см и мм каналам при синхронной работе двух РЛС по совмещенному в пространстве элементу разрешения на вертикальной (ВП) и горизонтальной поляризациях.

Таблица 1
Вероятностные характеристики выбросов в отраженном от моря сигнале на волнах 3 см и 8 мм

Поляризация излучения–приема	Угол скольжения, мрад	Вероятность выброса		Вероятность совпадения выбросов	Порог, П
		на волне 3 см	на волне 8 мм		
ГП	3...10	0,27	0,26	0,06	1,5
ВП	3...6	0,22	0,26	0,05	1,5
ГП	3...10	0,09	0,10	0,02	2
ВП	3...6	0,09	0,10	0,01	2

Видно, что они имеют примерно одинаковую вероятность как на волнах см, так и мм диапазонов, однако следует отметить: что вероятность совпадения выбросов достаточно мала, что может использоваться для повышения эффективности подавления помех от моря путем совместной обработки см и мм каналов РЛС. Слабая корреляция выбросов отражений объясняется формированием рассеянного сигнала в этих диапазонах различными резонансно-рассеивающими элементами на морской поверхности, которые являются некогерентными.

На рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе (по осям абсцисс и ординат) приведены доплеровские спектры всплесков и пауз отражений от моря на волне 3 см при ГП и выборе различных классификационных порогов принятия решения (кривые: 2 – $U_{\text{пор}} = \bar{U}$, $p = 0,55$; 3 – $U_{\text{пор}} = \bar{U}$; 4 – $U_{\text{пор}} = 2\bar{U}$, $p = 0,28$; 5 – $U_{\text{пор}} = 3\bar{U}$, $p = 0,023$; 6 – $U_{\text{пор}} = 2\bar{U}$).

Здесь p – обозначает вероятность всплеска. Скорость ветра во время опыта составляла $U_v = 10$ м/с, средняя высота волн – $H_v = 2...2,5$ м. Поскольку достаточно протяженные участки спектра $S(F)$ в двойном логарифмическом масштабе удовлетворительно аппроксимируются прямой, то для их описания можно использовать функции вида

$$S(F) \approx S_0 \left(1 + \frac{(F - F_0)^n}{\Delta F} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где F_0 , ΔF , n характеризуют центральное смещение частоты, полуширину спектра и скорость убывания спектральной плотности с частотой.

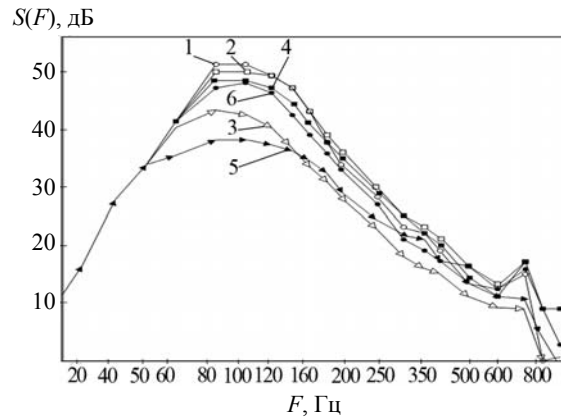


Рис. 3. Спектры всплесков и пауз отражений от моря при разных уровнях классификационных порогов: 1 – полный спектр процесса; спектры: 2 – всплесков; 3 – пауз; 4 – всплесков; 5 – всплесков; 6 – пауз

Для доплеровских спектров отражений во время «всплесков» характерно на 20...30 % большее доплеровское смещение частоты, ширина спектра и меньшая скорость убывания спектральной плотности с частотой, чем для пауз.

3. Описание РЛ-отражений от суши.

Для изучения характеристик рассеяния использовались записи сигналов, полученных на импульсных РЛС с длинами волн 2 см и 8 мм. Отдельно изучались характеристики рассеяния от различных типов поверхностей: поля, луга, зоны застройки, лесные массивы. Для каждого из типов местности (фазового состояния) исследовались законы распределения амплитуд (ЭПР), временные и пространственные спектры, в том числе, и для каждого из фазовых состояний, функции распределения размеров отражающих областей и промежутков между ними при установке порога принятия решения, равного среднему значению амплитуды, а также в 2 и 4 раза больше него. Установлено, что законы распределения амплитуд удовлетворительно описываются составным рэлеевским законом распределения для всех типов местности при соотношении компонент всплеск/пауза 23...30 дБ и вероятности существования всплесков 0,17...0,3.

Размеры отражающих областей различных типов местности для уровня обеспеченности 0,5 и порога принятия решения в 0 и 6 дБ относительно среднего значения приведены в табл. 2.

Таблица 2
Размеры отражающих участков местности

Порог, дБ	Размер участка, м		Промежутки, м		Δr , м
	0	6	0	6	
Лес	80	67	204	276	93
Застройка	76	58	142	245	40
Луг	71	53	71	124	47
Поле	40	22	58	102	20

На рис. 4 приведены пространственные спектры рассеяния от различных типов местности. Они удовлетворительно описываются фракталами [13].

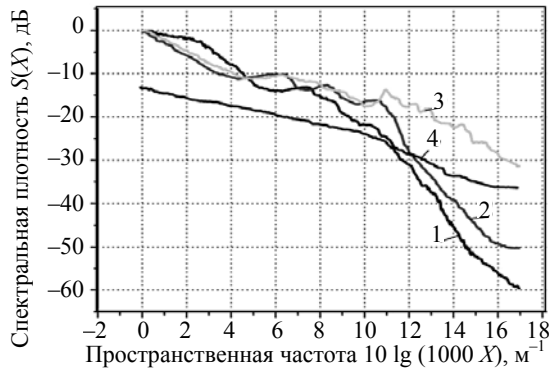


Рис. 4. Пространственные спектры отражений от местности: 1 – лес; 2 – застройка; 3 – поле; 4 – луг

В энергичной области они практически одинаковы и имеют наклон: $S(\chi) \sim \chi^{-n}$, где $n \in (1...1,5)$. В высокочастотной области наклон убывания спектральной плотности возрастает $n \in (3...6)$.

4. Описание РЛ-отражений от «ясного» неба. Экспериментальное изучение пространственных распределений зон отражения от «ясного» неба (см. рис. 1, в) проведен с использованием высокопотенциальной РЛС с длиной волны 4 см [14, 15]. Учитывая, что характеристики рассеяния тропосферы не зависят от частоты, то полученные характеристики могут использоваться и для других диапазонов длин волн. На рис. 5 в масштабе, линеаризующем рэлеевский закон распределения, приведены интегральные функции распределения отражений от «ясного» неба при нескольких значениях коэффициента усиления. По оси абсцисс отложены величины амплитуд, полученные после нормировки на среднеквадратичное значение. Видно, что при снижении усиления приемника (кривая 3), позволяющем регистрировать сигналы в большем динамическом диапазоне, начинает проявляться негауссовость в повышенном, по сравнению со стандартным законом, уровне «хвостов» распределения.

Установлено, что все многообразие зон отражения условно может быть разбито на 4 группы: кольцевые и эллипсоидальные зоны отражения, у которых рассеяние происходит на перепаде коэффициента преломления на границе раздела; круговые и эллипсоидальные зоны отражения, внутри которых происходит рассеяние от турбулентностей с высокими значениями дисперсии коэффициента преломления, заполняющих зону. Анализ показывает, что «ангель», у которых от-

ражение происходит от кромки, составляют 3...16 % от общего количества. Общая площадь, занимаемая «ангелами» при градиенте коэффициента преломления $g_{N_3} = -0,09...-0,14$ N-ед./м, т. е. при рефракции, приближающейся к критической, составляет 7...21 %. Средние размеры отражающих областей зависят от тропосферной рефракции и при значениях $g_{N_3} = -0,14$ N-ед./м как по дальности, так и по азимуту составляют 400...600 м на дальностях наблюдения 20...40 км. Увеличение скорости ветра от 1 до 6 м/с приводит к возрастанию в 2...2,5 раза их средних размеров, а также, как правило, к уменьшению площади экрана, занимаемой «ангел-эхом». Среднеквадратичное значение флуктуаций характерных размеров слабо зависит от скорости ветра, но на эту характеристику оказывает существенное влияние градиент коэффициента преломления. При его возрастании происходит увеличение и дисперсии флуктуаций размеров.

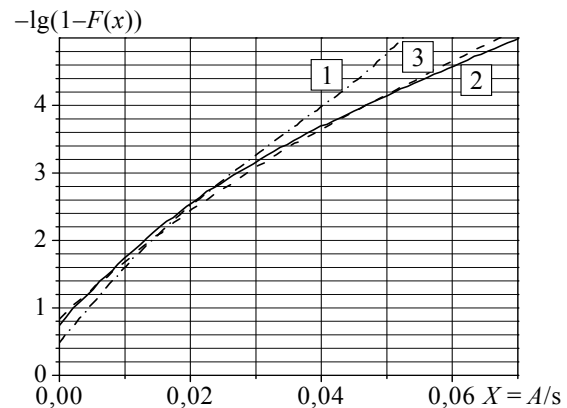


Рис. 5. Функции распределения отражений от «ясного» неба при разных усилениях приемника: 1–3 – последовательное снижение усиления приемника от максимального до минимального

5. Описания сезонных зависимостей коэффициента преломления тропосферы.

С использованием результатов систематических измерений (до 8 раз в сутки) метеорологических параметров (температуры, давления и влажности) штатными метеостанциями Украины были оценены значения коэффициента преломления [16] и сформированы базы данных по всем 24 областям Украины. Всего охвачено 100 городов за период 2 года (с 01.01.2010 по 01.01.2012 г.). На рис. 6, а показано поведение за 2 года коэффициента преломления N для Севастополя, а на рис. 6, б – его интегральная функция распределения в масштабе, линеаризующем нормальный закон распределения. Аналогичный вид у поведения N для всех других городов. Зимой, независимо от того, где располагается город $N \sim 310$ N-ед. Летом же, в зависимости от того, расположен город на побе-

режье моря или в глубине страны, $N \sim 380$ N-ед. или ~ 350 N-ед. Нестационарность суточного и сезонного поведения N проявляется в негауссовости его распределения за 2 года (рис. 6, б). Следует отметить, что для функции распределения характерны меньшие, чем для стандартных моделей, значения вероятности в области отклонения от среднего значения как в меньшую, так и большую сторону. Это означает, что для их математического описания может быть продуктивно использование финитных функций Кравченко-Рвачева [11–13]. Исследование распределения N

внутри каждого их сезонов показало, что оно удовлетворительно в первом приближении, и описывается стандартной гауссовой моделью (рис. 6, в), однако в дальнейшем целесообразно использование для их описания финитных функций Кравченко-Рвачева. Используя метод наименьших квадратов, аппроксимированы (кривая 2) экспериментальные значения коэффициента преломления N (кривая 1) 4-компонентным гауссовым процессом – каждая из компонент для своего сезона года (кривые: 3 – лето, 4 – осень, 5 – зима, 6 – весна) – рис. 6, г.

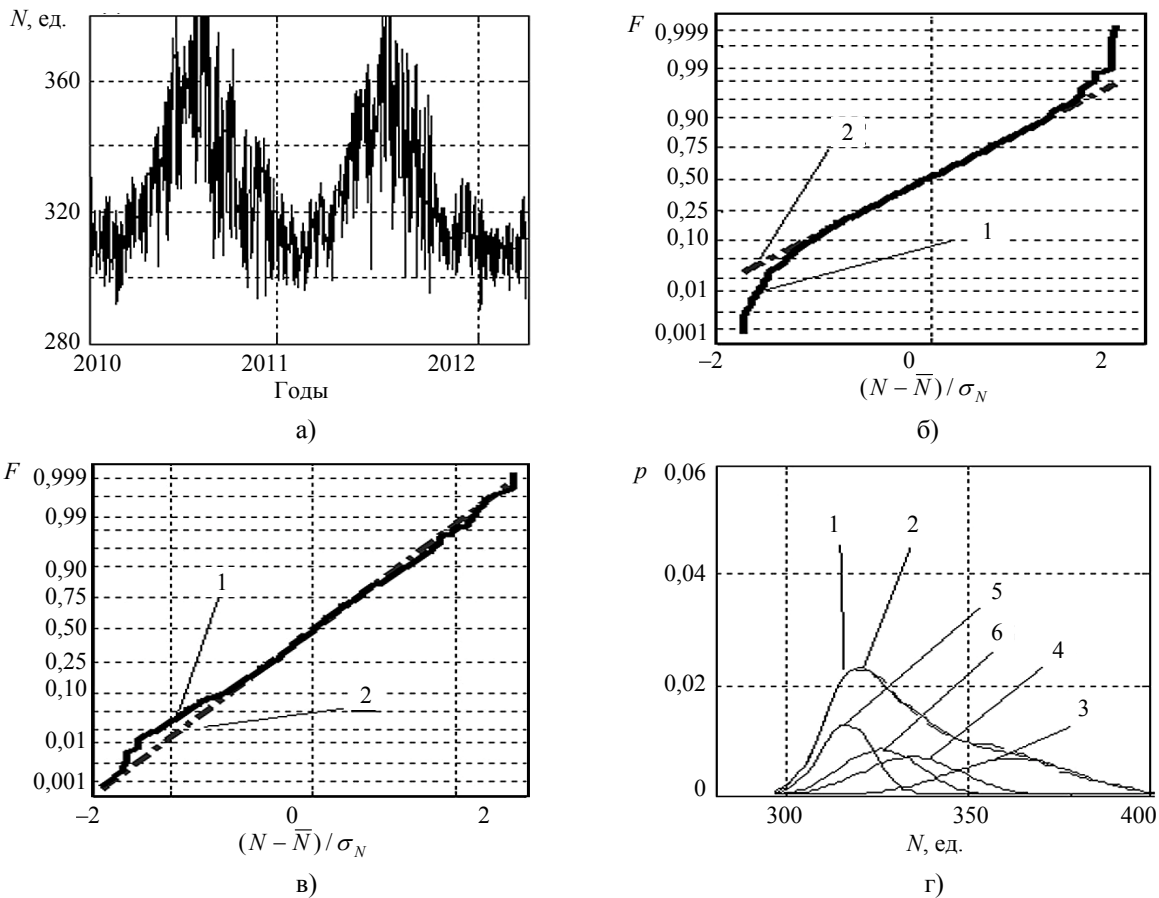


Рис. 6. Коэффициент преломления: а) – сезонная и суточная зависимость; б) – функция распределения; в) – интегральное распределение для лета (1 – эксперимент, 2 – стандартное нормальное распределение); г) – плотность распределения

Статистическое описание N основано на использовании рассмотренной ранее модели вложенных двухкомпонентных процессов. В каждый момент времени процесс может находиться в одном из $K = 4$ возможных фазовых состояний $H_i \in v_1 \dots v_K$ (v_1 – лето, v_2 – осень, v_3 – зима, v_4 – весна), причем полагается известным начальное состояние $\theta_0 = v_i$ в момент времени $t = 0$. Отличие от рассмотренной ранее модели смены состояний состоит в том, что рассматриваемый процесс является детерминированным, а значит,

одношаговые вероятности перехода $(\pi) = \|\pi_{ij}\|$, где $i, j = \overrightarrow{1 \dots K}$ имеют вид $\pi_{ij} = 1$ при $j = (i + 1)_{\text{mod } 4}$ и $\pi_{ij} = 0$ в остальных случаях. Каждому ненулевому элементу π_{ij} матрицы вероятности перехода можно сопоставить случайную величину T_{ij} с плотностью распределения $f_{ij}(t)$ – времени ожидания в состоянии v_i до перехода в состояние v_j (длительность сезона), причем в нашем случае возможны только переходы

$v_i \Rightarrow v_j$, где $j = (i+1)_{\text{mod}4}$. Поскольку величины T_{ij} не распределены по экспоненциальному закону, то такой процесс будет полумарковским. Внутри каждого v_i состояния процесс будем полагать квазистационарным с плотностью распределения значений $[P_i(N)]$ и спектром $[N_i(\omega)]$. Пусть в начальный момент $t=0$ система находилась в одном из фазовых состояний множества E , например в состоянии $i \in E(1, 4)$ на протяжении некоторого случайного времени θ_0 , после чего мгновенно перешла в состояние $j \in E$. Находясь в i -м состоянии, система описывается плотностью распределения значений коэффициента преломления и его спектром, который учитывает особенности временного поведения коэффициента преломления для j сезона. Средние m и среднеквадратичное σ значения коэффициента преломления в различные сезоны года для городов Украины, в которых располагаются опорные пункты системы контроля навигационного обеспечения, полученные с использованием штатных метеорологических данных (температуры, давления, влажности) за период с 01.01.2010 по 01.01.2012 г. приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики распределения по сезонам для городов Украины, в которых размещены пункты системы контроля навигационного обеспечения

Город	Лето		Зима		Осень		Весна	
	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ
Мукачеве	328,7	10,4	309,0	4,9	313,1	8,9	312,7	8,6
Яворов	343,2	12,5	312,7	4,4	321,4	8,9	316,0	10,9
Дунаевцы	340,0	12,6	307,1	3,9	317,5	8,4	309,0	9,6
Винница	332,7	13,5	304,0	4,2	311,7	8,3	304,4	10,4
Киев	331,0	15,0	308,1	4,4	315,4	8,3	307,0	10,0
Чернигов	333,0	14,5	309,1	4,0	317,4	8,6	310,0	9,8
Лубны	326,7	15,2	309,3	4,0	315,8	9,3	308,6	8,9
Кировоград	331,8	17,2	309,3	4,6	316,1	10,5	309,6	10,2
Запорожье	333,2	20,1	313,1	4,5	320,5	11,1	315,1	10,5
Харьков	320,3	19,0	309,5	4,0	315,4	10,1	308,8	10,1
Луганск	329,4	18,0	313,0	4,6	319,4	10,1	314,4	10,9
Измаил	342,0	17,6	314,5	4,6	324,8	11,5	319,0	9,6
Одесса	348,9	16,5	315,3	6,4	328,4	11,9	319,7	11,2
Евпатория	346,6	18,5	311,3	7,0	327,1	12,8	318,3	11,6
Севастополь	357,6	17,3	311,4	7,4	329,4	13,7	320,9	11,1
Феодосия	352,1	15,4	316,3	7,4	330,5	11,5	322,0	11,6

Следует отметить, что зимой для всех городов средние значения отличаются существенно меньше (не более чем на 1...2%), чем для других сезонов года. Летом разница может достигать 10%. Существенно выше (до 2,5...4 раз) летом и среднеквадратичное значение. Осенью и весной они имеют для многих городов примерно одинаковую величину, промежуточную между летом и зимой.

Это означает, что в ряде случаев для описания сезонной изменчивости коэффициента преломления достаточно использовать 3-фазную модель, полагая, что весной и осенью характеристики коэффициента преломления для городов, не находящихся на побережье морей, отличаются незначительно.

Выводы. Показано, что сигналы, рассеянные различными физическими объектами (подстилающими поверхностями суши и моря, участками «ясного неба» и процессы различной физической природы (флуктуации коэффициента преломления тропосферы), удовлетворительно описываются вложенными полумарковскими процессами. Один компонент является дискретной полумарковской цепью, описывающей смену фазовых состояний системы, связанную со сменой характеристик рассеивающих областей, либо сезонное их изменение. Второй процесс является непрерывным и описывает поведение внутри фазового состояния. Использование предложенного подхода позволяет сконструировать статистические модели для широкого класса сигналов и процессов, учитывающие их нестационарность. Определены характерные времена существования выбросов отражений от моря на разных поляризациях и длинах волн, вероятности их совпадения во времени. Показано, что средняя длительность выброса может достигать десятых долей секунды, а длительность пауз – единиц секунд и возрастает при увеличении волнения. Для суши определены характерные размеры интенсивно отражающих областей для различных типов местности, которые не превышают 100 м, при этом промежутки между ними могут достигать 300 м, а также показано, что их пространственные спектры удовлетворительно описываются фракталами. Классифицированы конфигурации зон интенсивного отражения от «ясного неба». Определены их характерные размеры и вероятности существования каждого из видов отражений.

Показано, что статистики коэффициента преломления тропосферы для каждого из сезонов года в первом приближении могут описываться локально-гауссовыми моделями. Можно использовать для их описания финитные функции Кравченко-Рвачева.

Работа выполнена при частичном финансировании по договору №ДЗ/467-2011 с Держинформнаукой Украины и гранту совместных работ РФФИ и ДФФДУ № 7/12 – распоряжение Президиума НАН Украины от 29.03.2012 г. № 217.

Библиографический список

1. Луценко В. И. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от морской поверхности / В. И. Луценко // Успехи современной радиоэлектрон. – 2008. – № 4. – С. 59–73.
2. Simulation Statistical Model of Reflection from the «Clear-Sky» / V. I. Lutsenko, S. I. Khomenko, A. Ye. Zatserklyany, I. V. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – 63, N 5. – P. 371–380.

3. *Валеев В. Г.* Обнаружение слабых когерентных сигналов в коррелированных негауссовых помехах / В. Г. Валеев, Ю. Г. Сосулин // Радиотехника и электрон. – 1969. – № 2. – С. 230–238.
4. *Транк Г. В.* Обнаружение целей на фоне помех от морской поверхности с негауссовым распределением / Г. В. Транк, С. Ф. Георг // Зарубеж. радиоэлектрон. – 1971. – № 7. – С. 17–28.
5. *Kulemin G. P.* Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter / G. P. Kulemin; technic. ed. David K. Barton. – Boston, L.: Artech House, 2003. – 417 p.
6. *Влияние структуры морской поверхности на пространственные характеристики рассеянного ею излучения* / А. И. Калмыков, И. Е. Островский, А. Д. Розенберг, И. М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика. – 1965. – 8, № 6. – С. 1117–1127.
7. *Тихонов В. И.* Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – М.: Сов. радио, 1977. – 485 с.
8. *Королюк В. С.* Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – К.: Наук. думка, 1976. – 184 с.
9. *Кравченко В. Ф.* Атомарные функции в теории вероятностей и случайных процессов / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, А. Р. Сафин // Успехи современной радиоэлектрон. – 2009. – № 5. – С. 23–37.
10. *R-функции, атомарные функции, вейвлеты, фракталы и хаос* / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, А. Р. Сафин, Д. В. Чуриков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – 14, № 9. – С. 31–44.
11. *Кравченко В. Ф.* Новый класс аналитических вейвлетов Кравченко-Рвачева в задачах анализа сверхширокополосных сигналов и процессов / В. Ф. Кравченко, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектрон. – 2007. – № 5. – С. 29–47.
12. *Козлов Б.* Справочник по расчету надежности / Б. Козлов, И. Ушаков. – М.: Сов. радио, 1975. – 347 с.
13. *Применение фрактального анализа при обработке сельскохозяйственных угодий* / В. К. Иванов, Р. Э. Пашенко, А. М. Стадник, С. Е. Яцевич // Успехи современной радиоэлектрон. – 2007. – № 5. – С. 48–55.
14. *Estimation of the atmospheric refraction gradient from the radar observation data* / А. Е. Zatserklyany, V. A. Kabanov, D. Yu. Kulik, S. I. Khomenko // Rasprostranenie Radiovoln. – Ulyanovsk, 1993. – P. 88–92 (in Russian).
15. *Khomenko S. I.* The Atmospheric Refraction Influence upon the «Clear-Sky» Reflections / S. I. Khomenko, A. Ye. Zatserklyany, V. I. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – 63, N 12. – P. 1041–1052.
16. *Бин Б. Р.* Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 361 с.

V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko,
S. A. Masalov, S. I. Khomenko

USING NESTED SEMI-MARKOV PROCESSES FOR NONSTATIONARY SIGNALS AND FIELDS

A possibility of using embedded semi-Markov processes to create statistical models of the signals reflected from the interfaces (land and sea), as well as parts of «clear» sky was considered. Their constituent parameters were determined based on the experimental data. It is shown that nonstationary season changes in the refractive index of the troposphere can be accounted for describing its statistics by polygaussian models. Model parameters for each of the seasons were derived experimentally. The proposed approach can be used to create a simulation model of behavior of the refractive index using nested semi-Markov processes.

Key word: non-stationary signals and processes, backscatter, refraction coefficient, enclosed processes, compact function.

В. И. Луценко, И. В. Луценко,
С. О. Масалов, С. И. Хоменко

ВИКОРИСТАННЯ ВКЛАДЕНИХ НАПІВМАРКІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ОПИСУ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ І ПОЛІВ

Розглянуто можливість використання вкладених напівмарківських процесів для створення статистичних моделей сигналів, відбитих від поверхонь розділу (суші та моря), а також ділянок «ясного» неба. На основі експериментальних даних визначено параметри, що входять до їх складу. Показано, що нестационарність сезонної зміни коефіцієнта заломлення тропосфери може бути врахована через опис його статистик полігаусовими моделями. Експериментально отримано параметри моделі для кожного з сезонів року. Запропонований підхід може використовуватися для створення імітаційної моделі поведінки коефіцієнта заломлення з використанням вкладених напівмарківських процесів.

Ключові слова: нестационарні сигнали і процеси, зворотне розсіяння, коефіцієнт заломлення, вкладені процеси, фінітні функції.

Рукопись поступила 21.06.2012.