

В. В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, В. И. СТРЕЛЬЧЕНКО, Л. З. САХНОВСКАЯ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ АТМОСФЕРЫ

В зоне обнаружения современной РЛС обзора воздушного пространства при наличии в ней локальных неоднородностей атмосферы за счет неоднородного нагрева подстилающей поверхности земли может наблюдаться большое количество, до нескольких тысяч, дискретных отметок отражений (ДОО). Сложность обнаружения отметок ДОО в подобных условиях усугубляется тем, что отметки такого рода целеподобны, то есть имеют радиолокационные характеристики, сопоставимые с отметками от движущихся воздушных объектов [1-5]. Одной из радикальных мер решения проблемы является более полное использование возможностей обработки радиолокационной информации. Возникает необходимость развития методов обработки, адаптированных к изменениям внешних сигнальных и мешающих условий, обладающих различного рода нестационарностью. Поэтому актуальны рассматриваемые здесь вопросы экспериментальных исследований характеристик сигналов нестационарных отражений от локальных неоднородностей атмосферы, иногда называемых отражениями типа «ангел-эхо».

Отражения типа «ангел-эхо» (АЭ) или ДОО известны уже длительное время. В ряде работ [1, 2, 5] были предприняты попытки объяснения их происхождения. Анализ теоретических работ и экспериментальных исследований позволяет утверждать, что природа АЭ может быть различной. Наиболее вероятными источниками этих отражений могут быть локализованные в тропосфере неоднородности атмосферы. Особенностью подобных отражений является их дискретный пространственно-временной характер, проявляющийся в наличии в отдельных или нескольких ячейках разрешения коротко- и достаточно долгоживущих (от 0,1 с. до нескольких десятков секунд) всплесков радиолокационных сигналов. Возникновение таких всплесков связывают с отражениями от турбулентно перемешивающихся неоднородностей атмосферы и их переотражениями от неоднородностей подстилающей поверхности земли и водной поверхности.

При малых углах скольжения ( $\Psi \leq 4^\circ$ ), что является характерным при наблюдении низколетящих воздушных объектов, отраженный неоднородной средой сигнал имеет ряд особенностей. На малых дальностях (менее 10 км), помимо непрерывного «шумового» (фонового) отражения, наблюдаются всплески, превышающие средний уровень сигнала на 10...15 дБ. [2, 5]. С увеличением дальности отраженный сигнал приобретает ярко выраженный импульсный (дискретный) характер.

Существует гипотеза [2, 5], что статистики подобных радиолокационных отражений от приземной и приводной сред при малых углах скольжения и высоком разрешении РЛС наилучшим образом аппроксимируются либо распределением Вейбулла:

$$P(x) = \frac{\eta}{\sigma} \left[ \frac{x}{\sigma} \right]^{\eta-1} \cdot e^{-\left[ \frac{x}{\sigma} \right]^\eta},$$

где  $\eta$  и  $\sigma$  - параметры распределения, либо логарифмически- нормальным распределением:

$$P(x) = \frac{1}{x\sigma_z \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\ln(x) - M_z]^2}{2\sigma_z^2}},$$

где  $M_z$  и  $\sigma_z^2$  – среднее и дисперсия величины  $\ln(x)$  соответственно. Отмечается, что с уменьшением углов скольжения статистику огибающей более адекватно описывает логарифмически- нормальное распределение.

рифмически-нормальное распределение. Отраженный от приводной поверхности сигнал имеет в себе как бы две независимые составляющие - шумовую (фоновые отражения) и дискретную (всплески). Проявлением такого подхода является аппроксимация распределения мгновенных значений отраженного от морской поверхности сигнала составным нормальным распределением, а распределения огибающей, соответственно, составным релеевским. При этом соотношение дисперсий компонент (дискретной к шумовой) может достигать  $k = 10 \dots 20$ , а вес дискретной компоненты может доходить до 0,1.

Экспериментальные исследования радиолокационных отражений от локальных неоднородностей атмосферы за счет тепловых и других выделений и выбросов проводились на РЛС обзора воздушного пространства серийного производства 5Н87 и 22Ж6 (10-и сантиметровой го диапазона волн) со следующими характеристиками (табл.):

Т а б л и ц а

Тип РЛС	$\tau_u$ , мкс	$F_n$ , гц	$\omega_\beta$ , об/мин	$\Delta\beta$ , угл.гр	$\Delta\epsilon$ , угл.гр
5Н87	4,7	365	6	1	cos $\epsilon$
22Ж6	1,33; 2,66; 5,32; 10,64	365	6	1	На прием-8 лучей (нижние- 2,9 <sup>0</sup> , 3,0 <sup>0</sup> )

Здесь  $\tau_u$ -длительность зондирующего импульса РЛС;  $F_n$  – частота повторения импульса зондирования;  $\omega_\beta$  – скорость вращения антенны РЛС;  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\epsilon$  – диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места соответственно.

Запись радиолокационной информации на кассету видеоманитофона осуществлялась с использованием устройства формирования и хранения изображения радиолокационной обстановки в буферном запоминающем устройстве (БЗУ). В дальнейшем сформированная в БЗУ в координатах азимут-дальность цифровая матрица амплитуд сигнала отражений опрашивалась в телевизионном стандарте и подавалась в аналоговом виде на видеоманитонфон. Формируемый в БЗУ массив данных представляет собой прямоугольный растр размером  $N \times M$  элементов. В дальнейшем будем полагать, что запоминание элементов раstra производится в прямой растровой последовательности слева направо и сверху вниз, напоминающей телевизионный растр, ось  $X$  (азимут) - направлена вправо по краю раstra, а ось  $Y$  (дальность) - направлена вниз.

Анализ теоретических работ и экспериментальных исследований, проведенных с участием авторов, позволяет утверждать, что наиболее вероятными источниками радиолокационных отражений типа «ангел-эхо» являются локализованные диэлектрические неоднородности, формирующиеся в тропосфере.

Поэтому место, время и условия проведения экспериментальных исследований радиолокационных отражений типа «ангел-эхо» (АЭ) подобраны с учетом возможностей появления локализованных диэлектрических неоднородностей атмосферы над сушей и морем.

В зависимости от физических условий могут возникать и развиваться две разновидности интересующих нас атмосферных неоднородностей.

Атмосферные области с повышенной температурой, образующиеся за счет получения тепловой энергии от неравномерно нагретой поверхности. Они расширяются и под действием подъемной силы восходят вверх. При этом:

- отражения типа АЭ наиболее интенсивны при высоком нагреве подстилающей поверхности, которая имеет локальные области с разной степенью нагрева и водоемы малой площади (например, местность в районах Приазовской или Причерноморской степей в весенне-летний период);

- периоды появления и существования мешающих отражений (МО) типа АЭ совпадают с суточными изменениями (ночь – день и наоборот), когда характерен наибольший тепловой контраст в разных областях подстилающей поверхности.

Вторая модель формирования и развития атмосферных неоднородностей характерна для мест послеливневых дождей при температурах окружающей среды до  $+30^{\circ}\text{C}$  и при низкой относительной влажности. При этом возникают так называемые паротемпературные линзы со значительной влажностью  $l \gg l_{\text{окр.}}$  и низкой температурой  $T \ll T_{\text{окр.}}$ . Источниками таких линз могут быть различного рода водоемы или места скопления влаги на поверхности земли, как естественного, так и искусственного происхождения.

Снимаемые с выхода амплитудного детектора обзорной РЛС сантиметрового диапазона отраженные сигналы записывались на магнитные носители с помощью видеоманитофона. Эксперимент проводился в районах Приморской степи в режимах РЛС кругового обзора и с остановленной антенной. Продолжительность записи на магнитный носитель около 3-х часов.

Регистрировались плотности отметок АЭ в трех дальностных зонах: 1-я – 0...50 км, 2-я – 50...100 км, 3-я – 100...150 км и в трех азимутальных зонах: 1-я –  $0...45^{\circ}$ , 2-я –  $45^{\circ}...90^{\circ}$ , 3-я –  $90^{\circ}...120^{\circ}$  (см. рис. 1). В каждом выделенном стробе зоны (например,  $\Delta D = 0...50$  км и  $\Delta \beta = 0...45^{\circ}$ ) проводился счет отметок МО. Эксперимент в каждой зоне проводился 15-20 раз.

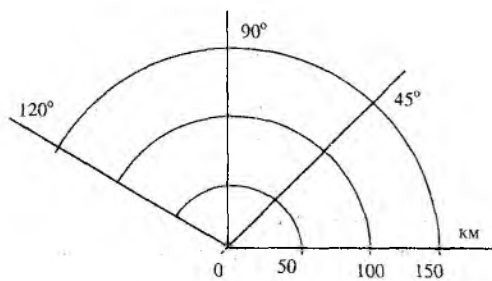


Рис. 1

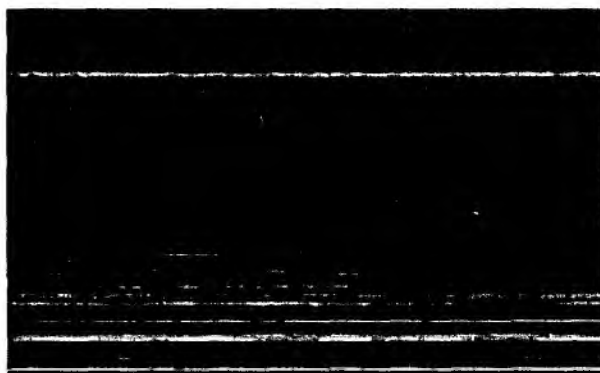
Записи реальных сигналов осуществлялись при следующих условиях и режимах работы РЛС кругового обзора: фиксированный обзор с остановленной антенной в характерных направлениях пространства; в степном и прилегающем к морю районах; время суток – вечернее, ночное, утреннее; климатические условия (летом и осенью)-умеренно теплая погода при низкой влажности с температурой воздуха  $20 - 30^{\circ}\text{C}$ , а также после ливневых дождей при высокой влажности и температуре окружающей

среды до  $30^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2 приведены возможные варианты изображений экрана индикатора РЛС в координатах азимут-дальность в секторе обзора  $\Delta \beta = 150...270^{\circ}$  в сентябре при ясной погоде, температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  в 11-00, при масштабе дальности 200 км (рис.2 а – в режиме кругового обзора, рис.2 б – в режиме с остановленной антенной, азимутальное направление –  $170^{\circ}$ ). Начало координат – левая нижняя точка изображения. Изображение, полученное в режиме с остановленной антенной, задано в координатах дальность–время (время полного обновления изображения – 10 с), то есть при фиксированной дальности изображение определяется флуктуациями сигнала от одного элемента разрешения.



а)



б)

Рис. 2

На рис. 3 показана зависимость отраженного сигнала  $A$  от азимута  $\Delta \beta$  в режима кругового обзора (см. рис. 2а) в кольце дальности 40 км.



Рис. 3

В состав установки оцифровки и ввода в ПЭВМ экспериментальных данных радиолокационных сигналов входили: устройство для воспроизведения видеозаписи экспериментальных данных радиолокационных сигналов с магнитного носителя в телевизионном стандарте (видеомагнитофон); устройство оцифровки, ввода в ПЭВМ и регистрации радиолокационного сигнала; персональный компьютер типа Pentium-160 или лучше.

Для сопряжения устройства воспроизведения видеозаписи экспериментальных данных радиолокационных сигналов с персональным компьютером использовался серийная плата TV-тюнера ATI M-230 с разработанным программным обеспечением, в состав которого входят драйверы поддержки работы монитора и пакет, обеспечивающий работу компьютера в режиме TV-тюнера [6, 7].

Отображаемые изображения в окне записывались на жесткий диск в одном из форматов, используемых для хранения растровых графических изображений (например: BMP, PCX, TIF, GIF и т. д.). Нами выбран файловый формат BMP по причине удобства представления и работы с элементами изображения. Формат BMP является широко используемым для систем DOS и Windows и поддерживается многими приложениями.

Расшифровка и обработка последовательности радиолокационных изображений, записанных на винчестере, оптическом (CD) или магнитном дисках можно производить всеми доступными средствами, реализованными на любом языке программирования, например, C++, Паскаль, Бейсик или на Ассемблере. При проведении поисковых и исследовательских вычислительных работ, когда время выполнения расчетов с использованием программного продукта не играет большого значения, из-за вычислительной гибкости программ, простоты представления исходных данных и программной реализации вычислительных алгоритмов удобно использовать универсальные вычислительные средства системных приложений MathLab или MathCad, имеющие средства ввода/вывода изображений различных форматов представления, развитую систему программной поддержки вычислительных алгоритмов линейной алгебры, численного решения не только линейных, но и трансцендентных уравнений и так далее.

На рис. 4а и 4б в качестве примера расшифровки и обработки экспериментальных данных приведены графики зависимостей амплитуд  $A$  отражений типа «ангел-эхо» от времени, а также гистограммы (частоты появления  $p$ ) амплитуд в режиме остановленной антенны РЛС (см. рис. 2б) на дальности 36 км при длине выборки – 800 дискрет.

Таким образом, приведенная методика и устройство регистрации и упаковки радиолокационных отражений от локальных неоднородностей атмосферы в телевизионном стандарте позволяют, используя серийное устройство оцифровки и ввода в ПЭВМ (видеоадаптер), получить большие объемы радиолокационной информации, оперативно и с большой достоверностью расшифровать и провести цифровую статистическую обработку.

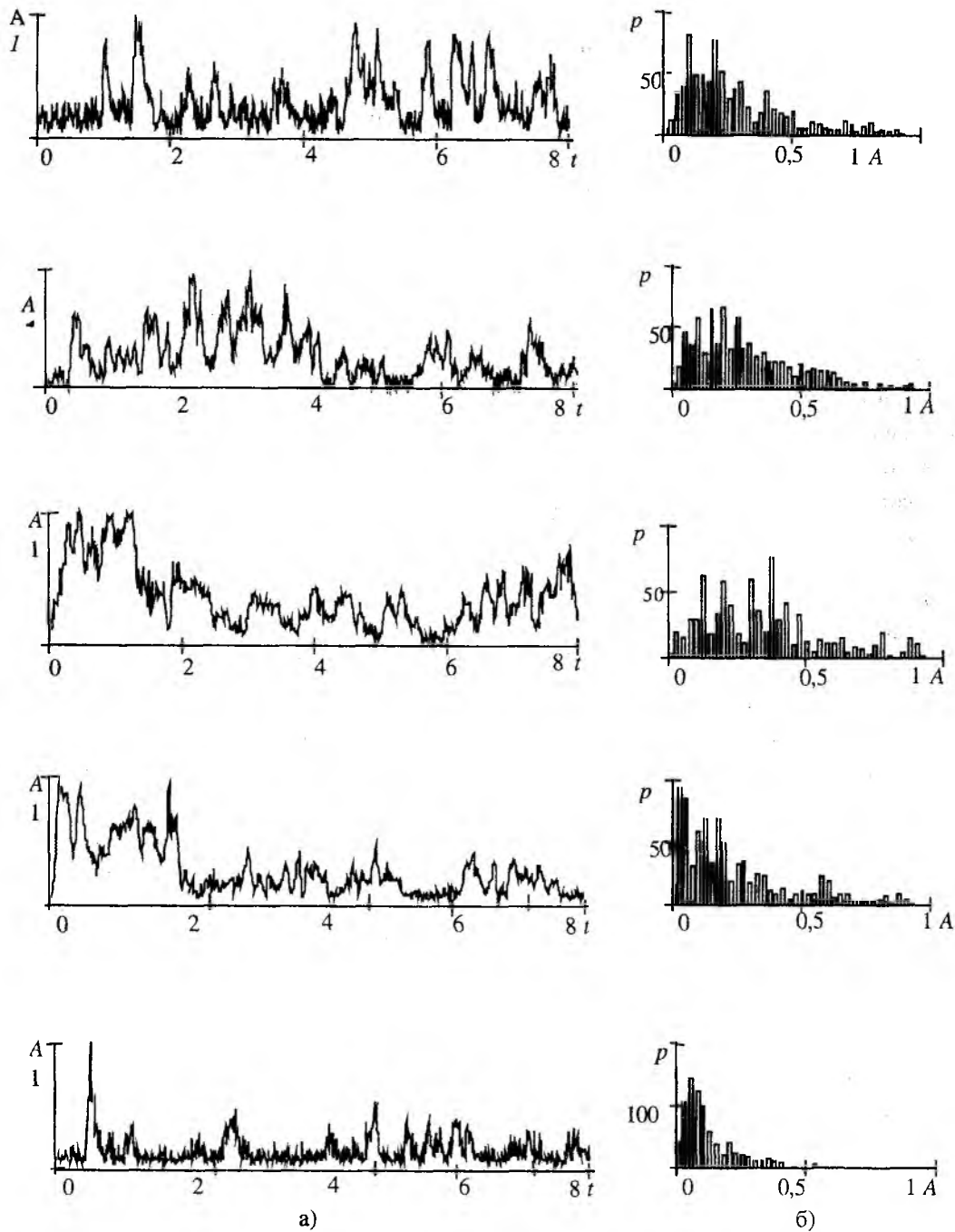


Рис. 4

**Список литературы:** 1. Черников А.А. Радиолокационные отражения от ясного неба. – Л.: Гидрометиздат, 1979. 126 с. 2. Дохов А.И., Жирнов В.В., Сахновская Л.З. Возможные причины и источники радиолокационных мешающих отражений типа «ангел-эхо» // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1997. Вып. 104. С. 102 – 111. 3. Принципы защиты радиопеленгаторов условиях воздействия мешающих отражений типа «ангел – эхо» / А.И. Дохов, В.В. Жирнов, С.Н. Матюшенко, Л.З. Сахновская // Там же. С. 112 – 119. 4. Жирнов В.В., Литвинов В.В. Проблема «ангел-эхо» и цифровые картинные технологии обработки радиолокационных сигналов и информации // Сб. докл. 4-й Междунар. науч.-техн. конфер. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 1998. Т. 2, С. 795–800. 5. Кулемин Г.П., Разказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев: Наукова думка. 1987. 6. M230. User's Manual. Tekram. 7. Айден К., Колесниченко О. и др. Аппаратные средства РС. С-П. 1998. 608 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 10.06.2002