

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПРИВОДНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

В. А. Миронов, С. И. Хоменко, Г. И. Хлопов

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ire@ire.kharkov.ua

Рассматриваются радиолокационные отражения от «ангел-эхо» (АЭ), особенности их радиолокационных изображений на индикаторах радиолокационных станций (РЛС), сезонный и суточный ход их появления, а также характеристики вероятности обнаружения. Отмечается, что обнаружение АЭ улучшается с увеличением температуры и влажности воздуха, а скорость перемещения АЭ не всегда совпадает со скоростью и направлением ветра. Ширина спектра АЭ и доплеровское смещение его максимума превышают аналогичные характеристики сигналов, отраженных от взволнованной поверхности моря. Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: радар, отражения, вероятность обнаружения, ширина спектра, доплеровская частота, траектория.

Исследования радиолокационных отражений от оптически ненаблюдаемых объектов в тропосфере – «ангел-эхо» (АЭ) – начались сразу после второй мировой войны и имеют большое научное и практическое значение для прогноза погоды, безопасности полетов авиации, а также для решения других важных задач, многие из которых описаны в тематическом выпуске журнала *Radio Science* [1]. Во многих случаях АЭ играют роль пассивных помех [1], ограничивая возможности радиолокационных станций (РЛС) при решении ряда прикладных задач. Поэтому исследование подобных явлений в тропосфере представляет не только научный интерес, но также важно для поиска путей выделения полезных сигналов на фоне отражений от АЭ.

Сложность и разнообразие исследуемых явлений пока не позволяют создать модели, которые дают возможность адекватно описывать характеристики АЭ. Одной из причин незавершенности существующих представлений является недостаточный объем экспериментальных исследований, так как необходимо использовать РЛС с большим энергетическим потенциалом, которые не всегда находятся в распоряжении исследователей.

Поэтому остается актуальным проведение радиолокационных наблюдений по накоплению объема знаний об АЭ, что позволит в будущем перейти к формированию модельных представлений, в связи с чем настоящая работа посвящена описанию результатов регулярных исследований АЭ в диапазоне СВЧ ($\lambda = 3 \div 10$ см).

В настоящее время понятие АЭ включает в себя достаточно широкий спектр явлений, вызывающих радиолокационные отражения в «ясном небе», включая:

– объекты окружающей среды (насекомые, твердые аэрозоли и др.);

– слоистые структуры в тропосфере, внутренние волны, валы и вихри;
– конвективные ячейки;
– флуктуации показателя преломления в тропосфере.

Каждый вид отражений имеет свои особенности, что позволяет различать АЭ различного происхождения. Предметом настоящего рассмотрения являются флуктуации показателя преломления и конвективные ячейки.

На рис. 1, а приведен пример радиолокационного изображения «ясного неба» в системе координат «дальность – высота», которое получено над сушей с помощью высокопотенциальной измерительной РЛС [2] на длине волны $\lambda = 3,2$ см при угломестном сканировании в секторе углов $0 \div 80^\circ$. При этом светлое пятно на малых дальностях ($R, h \leq 1,2$ км) соответствует «мертвой зоне» РЛС, область непрерывной засветки 1 обусловлена брэгговским рассеянием, а дискретные засветки 2 соответствуют отражениям от конвективных ячеек.

При малых углах места сигналы от АЭ маскируются отражениями от местных предметов 3, которые селективируются по характерным дугообразным отметкам.

На рис. 1, б приведен пример радиолокационного изображения «ясного неба» в системе координат «азимут – дальность», которое измерено над морем на длине волны $\lambda = 4,6$ см. На малых дальностях сплошная засветка 1 в левом углу изображения соответствует отражениям от морской поверхности, которые маскируют сигналы от АЭ, а при увеличении дистанции отражения от АЭ 2 выделяются своим дискретным характером, которые быстро меняют амплитуду и положение в пространстве.

Нами обобщены данные о распределении АЭ по координатам, скорости их движения и величине эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) [3–5, 7], которые приведены в табл. 1. Из нее сле-

дует, что сигналы АЭ распределены по дальности в пределах 0,5÷10 км, по высоте – 0÷6 км и в диапазоне скоростей 0÷40 м/с. Их ЭПР изменяется в диапазоне 10^{-4} ÷ 10^{-1} м², что сравнимо с ЭПР реальных целей.

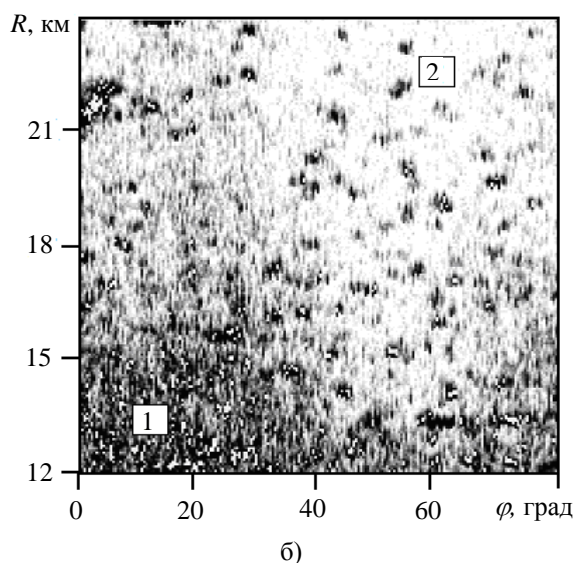
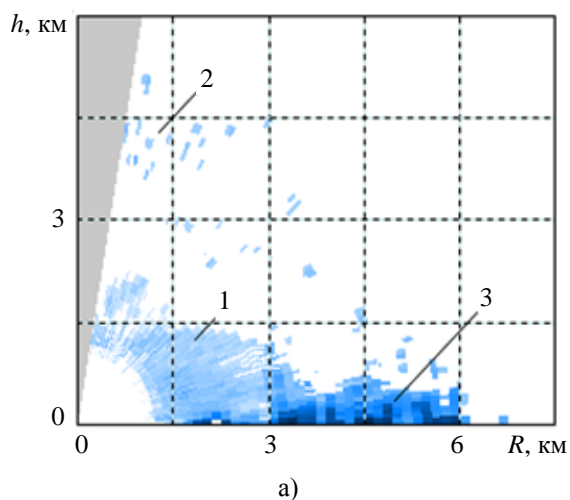


Рис. 1. РЛ-наблюдения АЭ: а) – над сушей ($\lambda = 3,2$ см); б) – над морем ($\lambda = 4,5$ см)

При этом время жизни АЭ составляет от нескольких десятков секунд до нескольких минут, а движение может быть хаотическим, однонаправленным в соответствии с направлением ветра, а также разнонаправленным с противоположными или пересекающимися направлениями движения на различных высотах.

Как показывает наш опыт, для селекции полезных сигналов на фоне отражений от АЭ применение традиционных методов селекции недостаточно эффективно, в связи с чем представляет интерес использование селекции полез-

ных сигналов по совокупности отличительных признаков:

- ширина спектра;
- доплеровский сдвиг частоты;
- время существования;
- траектория движения;
- ЭПР АЭ и др.

Для изучения возможностей подобной селекции нами проведены экспериментальные исследования характеристик АЭ с помощью когерентной ($\lambda = 10,6$ см) и некогерентной ($\lambda = 4,6$ см) высокопотенциальных РЛС, расположенных на берегу Черного моря. Подсчет числа источников отражений производился по экрану индикатора в секторе 45° по азимуту и 30 км по дальности, а характер движения АЭ определялся путем фотографирования экрана индикатора РЛС с временем экспозиции 7÷10 мин. После проявления фотопленки изображения преобразовывались в электронный вид с помощью сканера, а затем выделялись траектории засветок с помощью программы обработки изображений.

Обработка полученной информации проводилась также с целью измерения плотности АЭ на единицу зондируемой площади, времени жизни АЭ, траектории перемещения и зависимости их амплитуды и плотности от метеоусловий.

Отражения от АЭ представляют собой нестационарные сигналы, а их выделение на фоне отражений от морской поверхности весьма затруднительно, в связи с чем нами использовалась угловая селекция АЭ, когда измерения проводились при разных угловых положениях антенны.

Зависимость числа АЭ в виде конвективных ячеек (источники дискретных помех) от угла места антенны и отношение сигнал-шум приведены в табл. 2, которая показывает, что их число и мощность отраженного сигнала убывают с увеличением угла места.

В условиях проведенных экспериментов наибольшее число АЭ находилось на расстоянии 10÷15 км от береговой черты в утренние и вечерние часы, а днем это расстояние увеличивалось до 20÷25 км.

Регулярные наблюдения показали, что АЭ в виде конвективных ячеек над морской поверхностью существуют практически в течение всего года при разных метеорологических условиях и состояниях моря. Распределение общего количества наблюдений АЭ, которые проводились в течение года

$$P_M = \frac{N_M}{N_\Sigma},$$

и вероятность появления АЭ – $P_{АЭ} = \frac{N_{АЭ}}{N_M}$ приведены в табл. 3

(N_M – количество измерений в течение месяца,

$N_{AЭ}$ – количество измерений в течение месяца, в которых зарегистрированы АЭ, N_{Σ} – общее количество измерений). Как видно, в период наиболее

активной тропосферы (апрель – октябрь) вероятность наблюдения АЭ очень высока, спадая в осенне-зимний сезон.

Таблица 1

Распределение характеристик АЭ

Тип АЭ	Распределение высот		Скорость V , м/с	Распределение дальностей		Распределение ЭПР	
	%	h , км		%	R , км	%	σ , м ²
Брэгговское рассеяние	8	0÷0,2	10÷40	80	2÷8	80	$1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-1}$
	90	0,2÷0,3	1÷15	10	0,5÷2	10	$5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}$
	2	3÷6	1÷15	10	2÷10	2	$1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-5}$
						2	$1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-5}$
						6	$1 \cdot 10^{-5} \div 4 \cdot 10^{-5}$
Конвективные ячейки	–	0÷2	0,4÷1	–	0,5÷10	10	$1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}$
						10	$5 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$
						80	$1 \cdot 10^{-9} \div 1 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Зависимость числа АЭ от угла места

Отношение сигнал-шум, дБ	Угол места, град					Условия наблюдения
	0,75	1,25	3,25	5,25	7,25	
0	229	192	199	63	46	Штиль, скорость ветра 1,5÷2,5 м/с
3	117	100	109	51	23	
6	81	49	66	32	13	
9	58	18	18	7	2	
12	42	11	17	3	–	
15	25	3	3	1	–	
18	18	–	–	–	–	
21	12	–	–	–	–	
0	68	53	65	66	42	Высота волн 0,2 м, скорость ветра 1,5÷4 м/с
3	34	27	47	35	18	
6	18	16	19	16	15	
9	9	6	10	9	8	
12	4	2	10	4	7	
15	6	–	–	–	–	

Таблица 3

Вероятность появления АЭ

Параметры	Месяцы									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_M \cdot 100\%$	13,3	10,4	14,2	12,6	7,2	11,5	9,7	9,2	8,1	3,8
$P_{AЭ} \cdot 100\%$	57,8	71,7	90,5	71,4	84,4	94,1	95,3	90,2	44,4	17,6

В результате обработки данных с экрана монитора РЛС в режиме «дальность – азимут» нами построены траектории движения АЭ в виде источников дискретных помех, а в качестве примера на рис. 2 приведены основные их типы, которые соответствуют однонаправленному движению в соответствии с направлением ветра – рис. 2, а,

хаотическому движению – рис. 2, б и разнонаправленному движению – рис. 2, в. При проведении измерений скорость перемещения АЭ составляла 6÷28 м/с, достигая в отдельных реализациях 35 м/с.

Наибольшая продолжительность существования АЭ наблюдается в теплые безветренные дни и достигает 4÷5 мин, в то время как при вет-

реной погоде время жизни может сокращаться до десятков секунд.

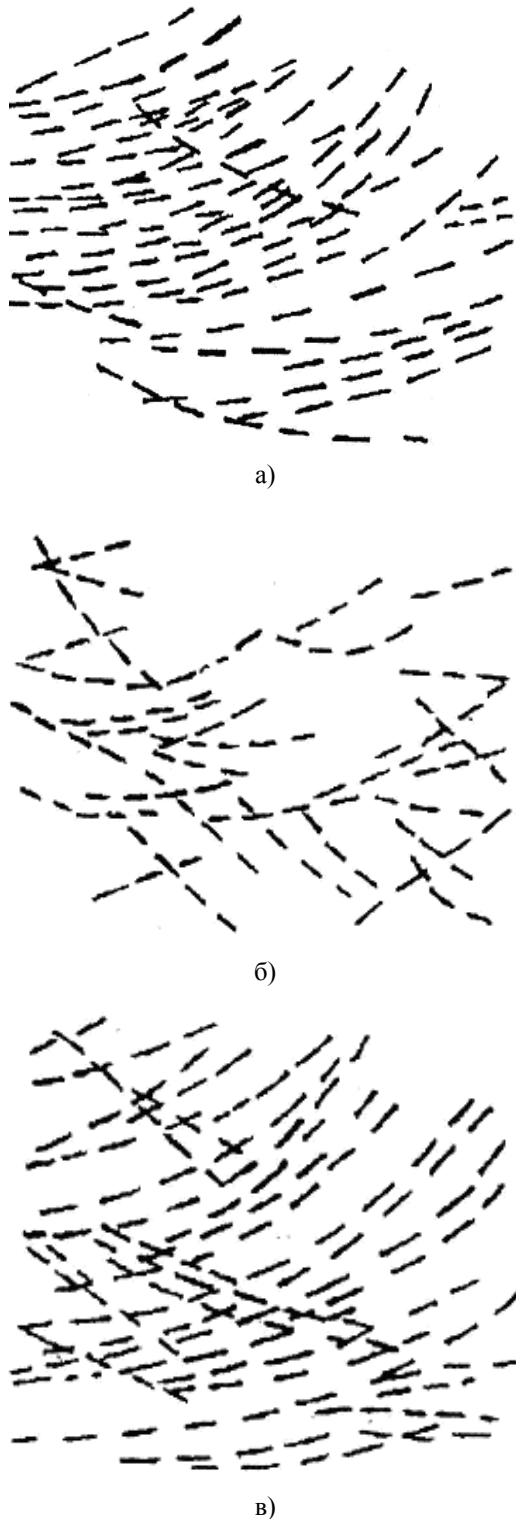


Рис. 2. Траектории движения АЭ в системе координат «азимут – дальность»

Важное значение для построения систем селекции полезных сигналов имеют спектральные

характеристики АЭ, которые, как показывают измерения, отличаются большой изменчивостью и нестационарностью. Текущие спектры отраженных сигналов имеют самую разнообразную форму, изменяясь от узкой дискретной линии, перемещающейся по оси доплеровских частот во времени, до широкого, почти прямоугольного спектра, характерного для частотно-модулированного сигнала. Иногда спектр состоит из нескольких узких линий, которые с течением времени сливаются в одну, а затем снова расщепляются на две или несколько спектральных полос.

На рис. 3 приведен пример спектральных характеристик сигналов АЭ в частотно-временной плоскости (3D-спектр) в диапазоне $\lambda = 35$ см, который характеризует высокую степень изменчивости текущих спектров при экспонировании через 1,1 с. При этом отражения от морской поверхности сосредоточены в области нулевых доплеровских частот, а спектры сигналов АЭ распределены в заметно более широкой области, что позволяет осуществлять их эффективную селекцию на фоне отражений от морской поверхности. В результате обработки данных измерений было вычислено среднее значение доплеровской частоты $\bar{F}_d = \frac{M_1}{M_0} = 221,5 \pm 95,4$

(средняя скорость $\bar{V} = 11,7 \pm 5,05$ м/с) и среднеквадратичное значение ширины спектра $\Delta F_d = \frac{M_2}{M_1} = 48,9 \pm 26,7$, где M_k – момент k -го порядка.

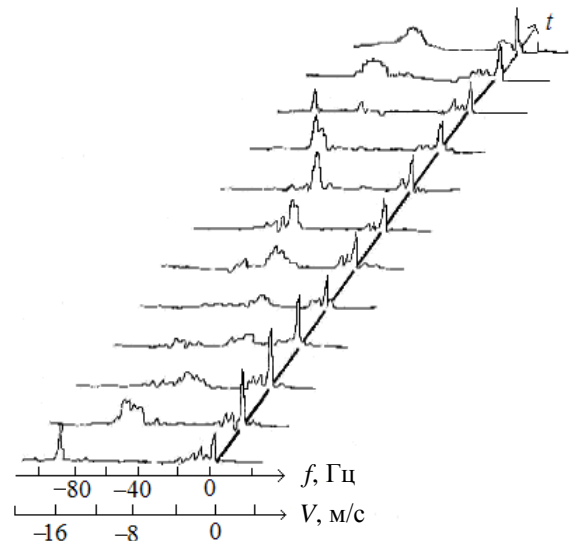


Рис. 3. 3D-спектр сигналов, отраженных от АЭ

Время корреляции на уровне 0,1 изменяется в пределах $1,5 \div 17$ с, изменение ширины спектра на уровне -10 дБ достигает величини-

ны 25÷85 Гц, а в некоторых случаях достигают 150 Гц. В то же время вариации ширины спектра на уровне 15 дБ могут достигать 400 Гц, хотя в некоторых случаях спектр сигналов, отраженных от АЭ, практически не отличается от спектра надводных объектов.

Результаты измерений спектральных характеристик на длине радиоволны $\lambda = 3,2$ см, которые получены при скорости ветра до 16 м/с,

приведены в табл. 4. Представление о форме спектра можно получить, сравнивая его ширину, измеренную на разных уровнях (от -3 дБ до -25 дБ). Среднее значение доплеровской частоты составляет $\bar{F}_d = 1399,5 \pm 258$ (средняя скорость $\bar{V} = 22,4 \pm 4,1$ м/с), а среднеквадратичная ширина спектра на уровне -3 дБ равна $\Delta F_d = 59,4 \pm 40,9$ Гц.

Таблица 4

Характеристики доплеровских спектров в диапазоне $\lambda = 3,2$ см

\bar{F}_d , Гц	$\Delta F_{-3дБ}$, Гц	$\Delta F_{-10дБ}$, Гц	$\Delta F_{-15дБ}$, Гц	$\Delta F_{-20дБ}$, Гц	$\Delta F_{-25дБ}$, Гц
1550	38	113	275	500	–
1462	25	63	212	212	–
1588	125	175	250	350	450
1788	25	300	375	500	625
1575	25	200	250	400	550
1325	37	50÷200	62÷240	500	750
1550	125	188	212	375	425
1562	25	550	575	700	875
1325	25	125	188	275	450
1062	75	100	125	200	–
1175	125	150	200	288	338
825	63	150	150	175	338

Сравнение данных, полученных в диапазоне $\lambda = 10,6$ см и $\lambda = 3,2$ см показывает характерную особенность сигналов, отраженных от АЭ, – значение их доплеровской частоты зависит не только от рабочего диапазона частот и скорости ветра. Это объясняется вращательным характером движения воздушных масс в конвективной ячейке, что заметно при использовании квадратурной обработки отраженных сигналов, которая позволяет измерять доплеровские частоты противоположных знаков. В этом случае сигнал от АЭ распадается на два доплеровских спектра, которые расположены симметрично относительно нулевых доплеровских частот и соответствуют противоположно вращающимся частям вихря. Как показывает опыт наблюдения АЭ, заметный вклад в значение доплеровской частоты дают восходящие (нисходящие) движения, в которых участвует конвективная ячейка.

Выводы. В результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

– отражения от АЭ в акватории Черного моря на длинах радиоволн $\lambda = 32$ см и $\lambda = 10,6$ см наблюдаются практически ежедневно в течение

всего года. Количество отражений особенно велико на малых углах места;

– время существования АЭ может достигать нескольких минут, траектории перемещения носят хаотический или частично упорядоченный по направлению ветра характер, а скорость перемещения может достигать величины 25÷35 м/с;

– среднее значение доплеровского спектра сигналов, отраженных от АЭ, и его ширина имеют случайный характер, а их средние значения зависят от направления и скорости ветра, хотя объема полученных данных не достаточно для установления количественных закономерностей.

1. Gossard E. E., Yeh R. C. Radar investigations of the clear air // Special issue of Radio Science. – 1980. – 15. – P. 319–328.
2. Белов Е. Н., Войтович О. А., Макулина Т. А. и др. Аппаратурно-программный комплекс для исследования радиолокационных отражений от метеорообразований // Радиопизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиопизики и электрон. НАН Украины. – 2009. – 14, № 1. – С. 57–63.
3. Черников А. А. Радиолокационные отражения от ясного неба. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – С. 68–72, 97–113.
4. Степанов В. Д. Радиолокация в метеорологии. – М.: Гидрометеиздат, 1973. – С. 120–134.
5. Морская радиолокация / Под ред. В. И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – С. 111–125.

6. Закс Л. Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – С. 45–67.
7. Stehwin W., Haykin S. Parametric Analysis of Radar Clutter // Int. Elek. Electron proc. Of 8-th Int. Elec. conf. – Toronto, 1983. – P. 136–139.

RESEARCH OF MICROWAVE BACKSCATTERING FROM SURFACE LAYER IRREGULARITIES

V. A. Mironov, S. I. Khomenko, G. I. Khlopov

In the paper the radar backscattering from angel-echo is considering, as well as peculiarities of radar images at radar monitors, seasonal and daily trends of their appearance and radar detection probability. It is noted that the more temperature and humidity of an atmosphere – the higher the probability of angel-echo detection. More over, speed of angel-echo movement not always correlates with the speed and direction of wind. Spectrum width and Doppler frequency shift exceed the same characteristics of signals, reflected from rough sea surface.

Key words: Radar backscattering, angel-echo, detection probability, spectrum width, Doppler frequency, trajectory.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЯННЯ РАДІОХВИЛЬ СВЧ-ДІАПАЗОНУ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ ПРИВОДНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ

В. О. Міронов, С. І. Хоменко, Г. І. Хлопов

Розглянуто радіолокаційні відбиття від «ангел-ехо» (АЕ), особливості їх радіолокаційних зображень на індикаторах радіолокаційних станцій (РЛС), сезонний та добовий хід їх появи, а також характеристики імовірності виявлення. Відмічається, що виявлення АЕ поліпшується із зростанням температури та вологості атмосфери, а швидкість переміщення АЕ не завжди співпадає зі швидкістю та напрямком вітру. Ширина спектру АЕ та доплерівський зсув його максимуму перевищують аналогічні характеристики сигналів, відбитих від схвильованої поверхні моря.

Ключові слова: радар, відбиття, ангел-ехо, імовірність виявлення, ширина спектру, доплерівська частота, траєкторія.

Рукопись поступила 28 июля 2009 г.