

ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

В.И. ЛУЦЕНКО, И.В. ЛУЦЕНКО, А.В. СОБОЛЯК

Оценена дальность действия систем акустической разведки, использующих собственное излучение наземных (транспортных средств, людей) и аэродинамических (самолеты и вертолеты) объектов. Рассмотрено влияние на спектры излучения атмосферы и подстилающей поверхности. Для типовых объектов разведки получены значения множителя затухания для различных метеорологических условий.

Ключевые слова: дальность действия, акустическая разведка, аэродинамические объекты, собственное излучение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больший интерес проявляется к активно-пассивным средствам радио [1–8] и акустической разведки [9–13]. Это связано с тем, что активно-пассивные системы используют существующие электромагнитные поля для подсветки объектов и приема, отраженных от них полей для их обнаружения и идентификации. В пассивных системах используют собственные тепловые или акустические излучения объектов для их выявления. Поэтому в отличие от активных систем радио- и звуко-гидролокации активно-пассивные и пассивные системы себя не демаскируют и поэтому обладают существенно большей живучестью. В последнее время, более чем через 80 лет с момента возникновения, снова возрос интерес к акустическим системам разведки. Первоначально их использовали в системе ПВО для обнаружения самолетов и наведения на них прожекторов и зенитных орудий [14, 15]. Затем, из-за возрастания скоростей самолетов и существенного снижения, получаемых при этом точностей наведения, а также в связи с появлением альтернативных методов, использующих для решения этих задач радиоволны [15], интерес к пассивным акустическим системам обнаружения и целеуказания исчез на длительное время. Однако сейчас из-за большей скрытности и живучести активно-пассивных комплексов, наблюдается очередной всплеск интереса к ним, в том числе, и к пассивным системам акустической разведки и целеуказания. Их пытаются использовать для обнаружения гусеничной и колесной наземной техники [11, 12], аэродинамических объектов [16]. Предпринимаются попытки их применения для обнаружения отдельных людей и групп, поиска и определения местоположения снайпера после произведенного выстрела, в рамках антитеррористических операций [10], а также для анализа возникновения экстремальных ситуаций в местах большого скопления людей.

Дальность действия активно-пассивных радиосистем, пассивных акустических систем и точность оценивания координат в значительной

степени зависит от уровня излучаемых полей, их спектральных характеристик, а также от параметров среды распространения и подстилающей поверхности, которые до настоящего времени пока изучены недостаточно. Целью настоящей работы является разработка методик и на их основе оценка дальности действия пассивных акустических систем при обнаружении гусеничных и колесных объектов наземной техники, аэродинамических объектов (самолетов и вертолетов), а также выстрелов из стрелкового оружия и орудий.

1. ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Уровни шумов различных источников. Уровни шума различных источников оцениваются в относительных единицах относительно порогового уровня слышимости, который условно принят в 10^{-12} Вт/м² на стандартном (от точечного источника) расстоянии в 1 м. Уровень звука (шума) измеряется в децибелах (дБ). Самый тихий звук, который может различить ухо, – примерно 4 дБ, а самый громкий, который способно выдержать – немногим более 150 дБ. При более сильных ударных волнах (около 200 дБ) начинается разрыв легких, а при уровне около 210 дБ наступает смертельный исход [27]. Типовые значения уровней шума некоторых источников по литературным данным приведены в табл. 1. Помимо интенсивности шумового сигнала, излучаемого источником, на дальность его обнаружения влияет распределение мощности по частотам (спектр), а также высота расположения источника шума относительно поверхности Земли.

Высота расположения источника акустического шума. Для работающего двигателя, определяется, в основном, положением выхлопной трубы. Для гусеничной техники составляет 1,1...1,2 м у современных систем и 1,3...1,5 м у модернизированных изделий [21]. Для колесной техники высота расположения около 1 м. Другим источником акустических сигналов является установленное на них воору-

жение. Высота стволов пушек 1,4...2,0 м для гусеничной и 2,5...3,0 м для колесной техники [21]. Высота размещения приемных микрофонов может составлять от 1,6 до 2 м [21].

Затухание звука в атмосфере. При распространении в атмосфере звук испытывает затухание. Наиболее надежные данные по октавным затуханиям сигнала в атмосфере в зависимости от ее параметров приведены в [23]. Они и будут использоваться в дальнейшем при расчетах. Зависимость погонного затухания для разных частот, полученная по представленным данным, показана на рис. 1.

Видно, что возрастание температуры и влажности уменьшает погонное затухание звука при распространении в атмосфере. Уже при использовании для аппроксимации затухания звука в атмосфере параболических зависимостей:

$$\gamma \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right] = A + B_1 f + B_2 f^2 \quad (1)$$

удаётся получить хорошие результаты.

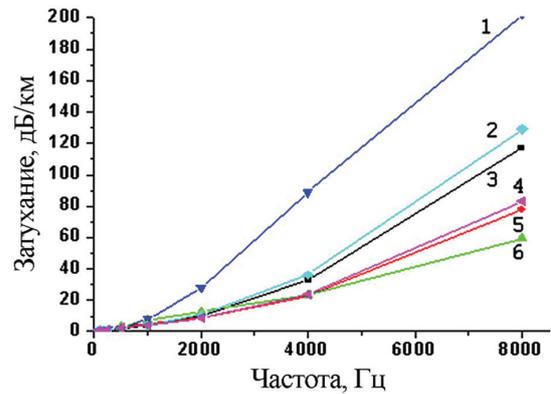


Рис. 1. Зависимость погонного затухания при распространении акустического сигнала в атмосфере от температуры t °С и относительной влажности η :

- 1- $t = 15$ °С, $\eta = 20$ %; 2- $t = 15$ °С, $\eta = 50$ %;
- 3- $t = 10$ °С, $\eta = 70$ %; 4- $t = 15$ °С, $\eta = 80$ %;
- 5- $t = 20$ °С, $\eta = 70$ %; 6- $t = 30$ °С, $\eta = 70$ %

Коэффициенты аппроксимации приведены в табл. 2.

Таблица 1

Уровни шума

Источник шума	Уровень звукового давления, дБ	Плотность мощности звука, Вт/м ²	Полоса частот, Гц	Примечание	Источник информации
Полная тишина 0	0	10 ⁻¹²		Угнетает	25
Шелест листья	10	10 ⁻¹¹		Звуковой комфорт	25
Шопот	20	10 ⁻¹⁰			25
Дождь	50...70		25–1000		25
Обычный разговор	60				25
Шаги человека	60...65	10 ⁻⁶ ...3 10 ⁻⁶	500–10000		9
Ветер	65–77	3 10 ⁻⁶ ...5 10 ⁻⁵	20–1000	Максимальный уровень	9
Неподвижная техника					
Гусеничная	65–72		30–2000	На расстоянии 100м	9
колесная	60–65		30–2000		9
Подвижная гусеничная техника	80–89		15–1000	На расстоянии 100м	9
Самолёт на старте	140 100	10 ² 10 ⁻²		Рядом На расстоянии 100м	16 24
Аэродинамические объекты					
Вертолет	82–89		100–2000	При пролете	9
самолет	72–74		100–2000	При пролете	9
Ударная волна пули	70–100		~600–2000	На расстоянии 100м	20
Максимальный уровень звука при выстреле из винтовки, из пушки.	159 188			Рядом Рядом	10 10

Таблица 2

Коэффициенты в регрессионных зависимостях погонного затухания

Температура, °С	Влажность, %	A	A1	B1	B2	R	SD
10	70	0,314	0,1	0,00161	1,622E-6	0,99996	0,2945
20	70	0,768	0,1	0,00199	9,489E-7	0,9990	0,9793
30	70	0,397	0,1	0,00488	3,060E-7	0,997	1,369
15	20	-4,616	0,3	0,0172	1,097E-6	0,9958	5,47
15	50	0,602	0,1	0,00168	1,796E-6	0,9999	0,390
15	80	0,644	0,1	0,00157	1,086E-6	0,9996	0,672

Здесь A, B1, B2 – коэффициенты параболической регрессии, R – коэффициент корреляции уравнения регрессии с экспериментальными данными, SD – среднеквадратичная ошибка аппроксимации.

При практическом использовании полученных аппроксимаций значение постоянной составляющей, определяющее затухание сигнала на низких частотах целесообразно брать из экспериментальных данных – приведенный в табл. 1 коэффициент А1. Получаемое при этом расхождение с аппроксимацией будет давать небольшую дополнительную погрешность на высоких частотах. Для оценки спектров источников звука на некотором удалении необходимо знать как исходный спектр излучения, так и дисперсные свойства среды распространения, а также учитывать влияние подстилающей поверхности.

Спектры объектов акустической разведки. В качестве объектов акустической разведки для бронетанковой техники могут выступать: наземные транспортные средства; аэродинамические объекты (самолеты и вертолеты), а также артиллерийские и ракетные системы. Наземные и воздушные объекты, представляющие опасность для бронетанковой техники, излучают звук в достаточно широкой полосе, однако в спектрах присутствуют спектральные компоненты, связанные с работой двигательной установки (частоты кратные частоте вращения коленчатого вала двигателя – лопастей винтов или лопаток турбин и компрессоров, рис. 2).

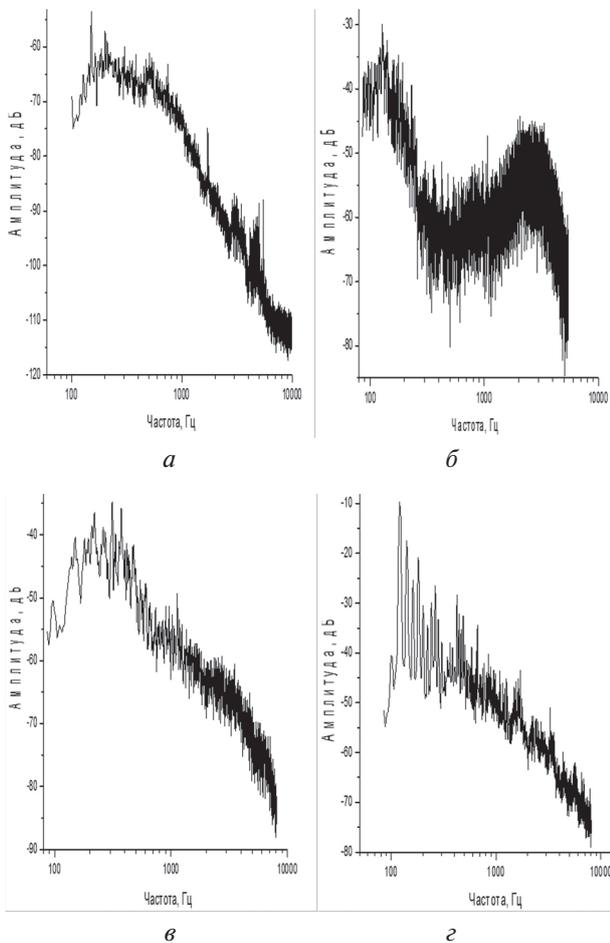


Рис. 2. Спектры акустических сигналов: а – вертолет МИ-2; б – самолет FALCON; в – выстрел орудия; г – дизель 800 об./мин

Характер их сигнала квазистационарный. При выстреле же сигнал существенно не стационарен. Использовать описание его в виде разложения по гармоническим функциям (спектра Фурье) – рис. 2, 3, в необходимо с большой осторожностью.

Поскольку детальная структура спектра достаточно изрезана, то при проведении расчетов дальности обнаружения и разрешающей способности удобно пользоваться моделью аппроксимации спектра с неким фиктивным параметром, характеризующим его эффективную ширину [22]. Вследствие изрезанности и изменчивости спектра флуктуаций амплитуд в качестве меры его ширины целесообразно использовать достаточно устойчивую характеристику: полосу частот, в которой заключена заданная доля полной средней мощности.

Она находится в результате решения уравнения:

$$\alpha = P(\delta F) = \frac{\int_0^{\delta F} S(F) dF}{\int_0^{\infty} S(F) dF}, \quad (2)$$

где $\alpha = P(\delta F)$ – заданная доля полной средней мощности флуктуаций; $S(F)$ – спектр флуктуаций амплитуды.

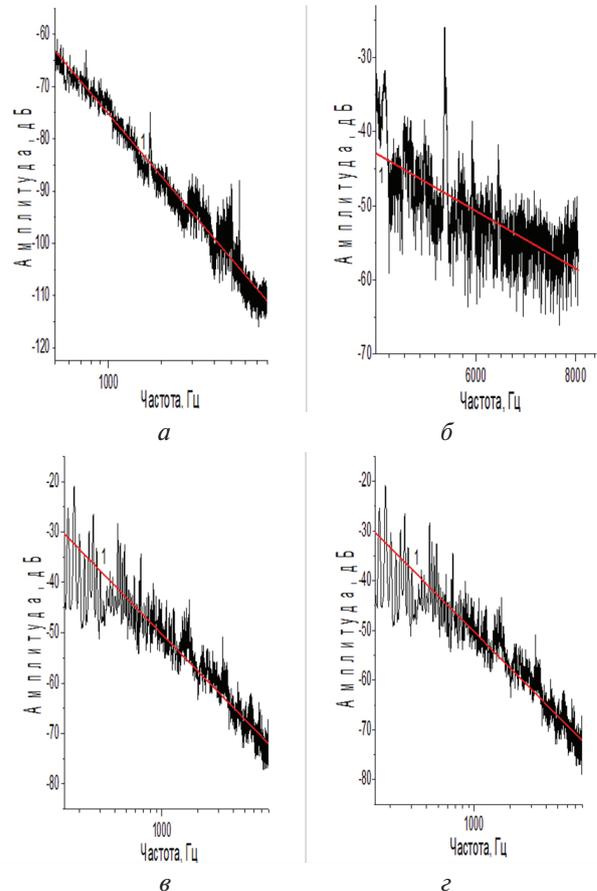


Рис. 3. Аппроксимация ВЧ части спектра акустических сигналов: а – вертолет МИ-2; б – самолет Jet 4500...8000 Гц; в – выстрел орудия 150...8000 Гц; г – дизель 800 об./мин; 1 – линия регрессии

В частности, в теории сигналов часто используется т. н. эффективная ширина полосы Δf_e , определяемая как:

$$P(\delta F = \Delta f_e) = 1/2. \quad (3)$$

То есть Δf_e – это полоса частот, в которой сосредоточена половинная мощность излучения.

Для аппроксимации спектра в высокочастотной области можно использовать фрактальные зависимости вида [22]:

$$S(f) = S_0 \left(1 + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^n \right)^{-1}, \quad (4a)$$

где Δf – ширина спектра, S_0 – значение спектральной плотности на нулевых частотах, а n – показатель степени, характеризующий скорость его убывания. На рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе приведены спектры некоторых типов объектов, а в табл. 3 – результаты их аппроксимации зависимостью вида:

Таблица 3

Коэффициенты аппроксимации ВЧ части спектра

Тип объекта	Полоса частот, Гц	a	b	R	$n = -\frac{b}{10}$
Вертолет Ми-24	500...8000	44,0	-39,7	-0,972	3,97
Дизель 800 об/мин	500...8000	22,3	-24,2	-0,941	2,42
Дизель 2000 об./мин	150...2000	30,34	-26,4	-0,887	2,64
Т-34	100...8000	8,27	-20,29	-0,897	2,03
Выстрел	150...8000	2,5	-17,5	-0,922	1,75
Выстрел 200 мм.	150...8000	45,77	-24,49	-0,944	2,45
Выстрел	400...6000	10,5	-22,2	-0,857	2,22
Самолет Jet (1-ый горб) от 540 до 2500 Гц	500...2500	55,22	-33,24	-0,800	3,32
Самолет Jet (2-ой горб) от 4510 Гц	4500...8000	183,25	-62,1	0,731	6,21

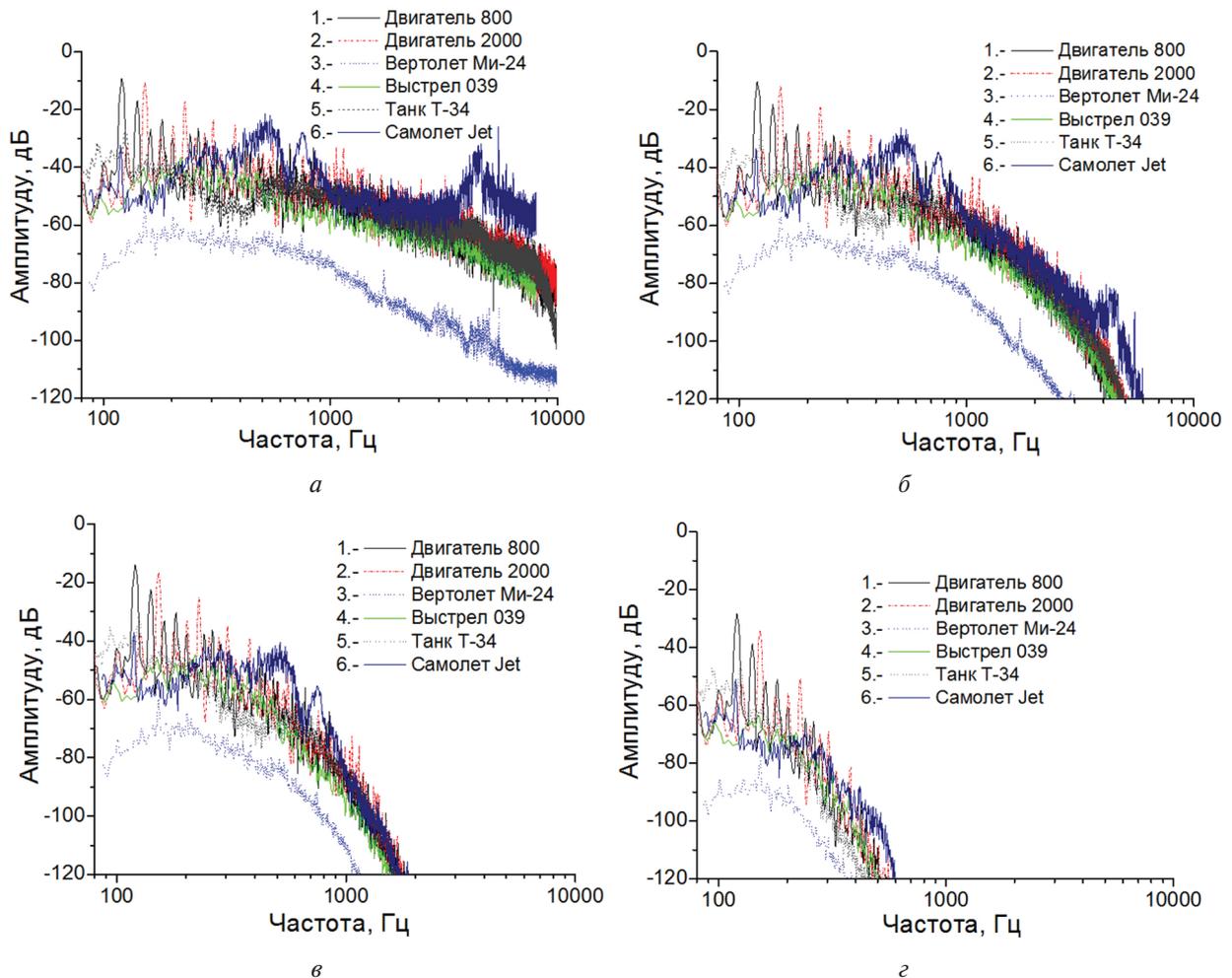


Рис. 4. Спектры акустических сигналов на разных удалениях от источников при распространении в атмосфере: a – возле источника; $б$ – дальность 0,5 км; $в$ – дальность 2 км; $г$ – дальность 8 км; 1 – дизельный двигатель 800 об./мин; 2 – дизельный двигатель 2000 об./мин; 3 – вертолет Ми-24; 4 – звук выстрела; 5 – танк Т-34; 6 – самолет Jet

$$\lg S(f) \approx a + b \lg(f). \quad (46)$$

Видно, что для большинства объектов (наземная техника, звук выстрела), скорость убывания спектральной плотности близка к $n \approx 2$.

Только для воздушных объектов (вертолетов и самолетов) она несколько выше $n \geq 3$.

Это означает, что спектры пульсаций акустического давления, во многих случаях, можно аппроксимировать выражением:

$$S(f) = S_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{\Delta f}\right)^2}, \quad (5a)$$

а корреляционные функции:

$$\rho(\tau) = \sigma_S^2 \exp\left(-\left|\frac{\tau}{\tau_{05}}\right|\right), \quad (5b)$$

где $\sigma_S^2 = S_0 \Delta f$, а $\tau_{05} = \frac{1}{2\pi \Delta f}$.

Для оценки дальности действия акустических систем разведки необходимо знать значения интегрального ослабления шума источника разведки за счет атмосферы и подстилающей поверхности. Для этого можно ввести понятие интегрального множителя ослабления, который учитывает влияние поверхности и атмосферы на ослабление сигнала конкретного источника шума. Пусть спектр источника звука $S_r(f, R, h_r, h_T)$, находящегося на высоте h_T и удалении от приемника R , который расположен на высоте h_r . Интегральное значение множителя ослабления $L(\bullet)$ акустического сигнала до приемника, расположенного на высоте h_r , и дальности R от источника звука, находящегося на высоте h_T за счет атмосферы $L_0(f, R)$ и подстилающей поверхности $V(f, R, h_r, h_T)$ при распространении на расстояние R и его спектр $S_r(f, R, h_r, h_T)$ определяются соотношением:

$$L(R, h_r, h_T) = \frac{\int_0^{\infty} S_r(f, R, h_r, h_T) df}{\int_0^{\infty} S_r(f, R=0, h_r, h_T) df} = \frac{\int_0^{\infty} S_T(f) L_0(f, R) V(f, R, h_r, h_T) df}{\int_0^{\infty} S_T(f) df}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены спектры излучения некоторых источников шума, рассчитанные на разных удалениях от них при распространении в атмосфере. Влияние поверхности раздела при этом не учитывалось, т.е. $V(f, R, h_r, h_T) \approx 1$. При расчетах использовались данные по затуханию звука в атмосфере [23, 24].

Они получены для случая наиболее сильного затухания сигнала, которое наблюдается при небольших температурах воздуха (15 град) и влажности (20 %). Сильнее трансформируются

спектры более широкополосных источников звука – реактивного самолета и звука выстрела. Меньше – более узкополосных – вертолета и дизельного двигателя. С возрастанием дальности снижаются различия в спектрах излучения разных источников.

Это связано с тем, что наиболее сильно затухают высокочастотные компоненты спектра. Помимо снижения интегральной интенсивности излучения, спектры излучения для всех источников при этом сужаются (рис. 4, а–з) и на больших удалениях становятся похожи (рис. 4, з), в то же время вблизи источника излучения различия между ними существенно больше (рис. 4, а).

Ширина спектра $\Delta f_e(R, h_r, h_T, \alpha)$ на уровнях полной мощности α с учетом выражений (2, 6) при этом определится из соотношения:

$$\frac{\int_0^{\Delta f_e} S_r(f, R, h_r, h_T) df}{\int_0^{\infty} S_r(f, R, h_r, h_T) df} = \alpha. \quad (7)$$

В табл. 4 представлены значения эффективной ширины спектра излучения некоторых источников шума, зафиксированные на разных уровнях мощности $\alpha\%$, а на рис. 5 – изменения нормированной ширины спектра на различных удалениях от них при распространении в атмосфере с достаточно низкой температурой и влажностью, т.е. для случая наибольших затуханий.

Таблица 4

Эффективная ширина спектра некоторых источников акустического шума

Тип объекта	Ширина спектра, Гц		
	50%	90%	99%
Уровень полной мощности	358	827,7	1626,7
Вертолет Ми-24	358	827,7	1626,7
Самолет Jet	572	4666	6391,3
Дизельный двигатель 800 об./мин.	121	199,2	1251
Танк Т-34	181,7	1349,9	4522,6
Выстрел орудия	315	834,4	3658

Видно, что наибольшей шириной спектра, в которой содержится половина излучаемой мощности, обладают воздушные объекты (самолеты и вертолеты), а также звук выстрела. Наземные объекты имеют существенно меньшую ширину спектра акустического излучения. На больших уровнях (90% и 99% мощности) тенденция сохраняется. Хотя разница в ширине спектра уменьшается. На рис. 5 представлены расчетные значения эффективной ширины спектра излучения различных источников на разных удалениях.

Следует отметить, что для большинства объектов разведки достаточно быстро происходит сужение спектра из-за существенно более сильного затухания высоких частот – рис. 5. Уже на дистанциях в 1...2 км эффективная ширина по уровню 50% уменьшается для большинства объектов в 1,5...2 раза, а на уровнях 90% и 99% в 2...6

раз и 3...10 раз соответственно. Исключение составляют объекты наземной техники, для которых большая часть мощности сосредоточена на низких частотах и поэтому на уровне 50% сужения спектра даже на удалениях в 8 км практически не происходит, а на уровнях 90% и 99% он сужается в 1,5 и 6 раз соответственно. Сужение эффективной ширины спектра источника с дальностью будет приводить к ухудшению разрешающей способности и, как следствие, ухудшению точности систем акустической разведки. Причем, как видно из приведенных данных, это ухудшение может быть весьма значительным (до 1 порядка).

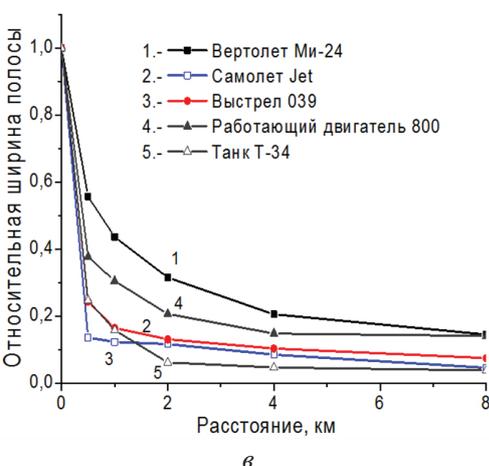
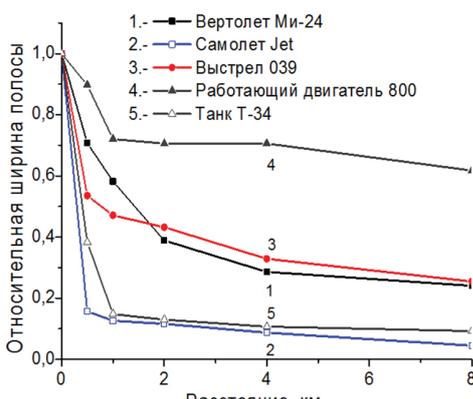
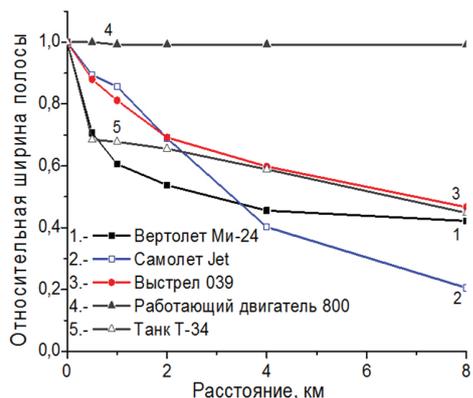


Рис. 5. Зависимость эффективной ширины спектра на разных уровнях мощности: *a* – 50%, *б* – 90%, *в* – 99%; 1 – вертолет Ми-24, 2 – Самолет Jet, 3 – выстрел орудия, 4 – дизельный двигатель 800 об./мин, 5 – танк Т-34

В силу изрезанности спектра источников шума и их широкополосности для оценки дальности обнаружения удобно пользоваться интегральной интенсивностью источника шума и интегральным ослаблением (6).

Используя реальные спектры источников звука, данные по затуханию сигналов в атмосфере [23, 24] на основании соотношений (6), получены значения интегральных ослаблений акустического поля различных источников излучения на различных дальностях за счет распространения в атмосфере при разной ее температуре и влажности, которые приведены на рис. 6.

Видно, что наибольшие затухания наблюдаются в атмосфере при низких температурах и малой влажности. Так при дальности до источника излучения 8км интегральное значение множителя ослабления атмосферы акустического шума, излучаемого объектами техники, при температуре 10 град и влажности 20% может достигать 40 дБ для реактивных самолетов, 20 дБ для вертолетов и звука выстрела и около 10 дБ для дизельных двигателей наземных объектов техники. Возрастание температуры до 20 град. и влажности до 70% приводит к снижению затухания при распространении до 14 дБ для самолета, 12 дБ для вертолета и звука выстрела и до 8..9 дБ для дизельных двигателей. При иных значениях температур и влажностей затухания имеют промежуточные значения. Наиболее сильно затухает шум реактивного самолета, несколько меньше – вертолета и звука выстрела. Слабее всего затухает шум работающего дизельного двигателя, у которого значительная доля мощности излучения приходится на низкие частоты. Интегральное затухание для всех типовых источников, как видно из рис. 6, удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью:

$$L[\text{дБ}] \approx \gamma_0 + \gamma_1 R[\text{км}]. \quad (7)$$

Коэффициенты аппроксимации приведены в табл. 5. Они получены методом наименьших квадратов (МНК). В ней приведены коэффициенты аппроксимации для различных источников излучения, а также для дизельного двигателя при различных оборотах. Возрастание количества оборотов от 800об/мин., которые соответствуют режиму холостого хода до 2000об/мин – номинальный режим работы приводит не только к пропорциональному количеству оборотов увеличения частот, связанных с ними спектральных составляющих, но и возрастанию спектральной плотности высокочастотных компонент (рис. 5, *a*). В связи с большим затуханием высокочастотных компонент звука при распространении в атмосфере, для режимов с большим количеством оборотов двигателя будет характерно и большее интегральное затухание акустического излучения в атмосфере. Это проявляется в больших значениях коэффициентов γ_1 – характеризующих наклон зависимости затухания от даль-

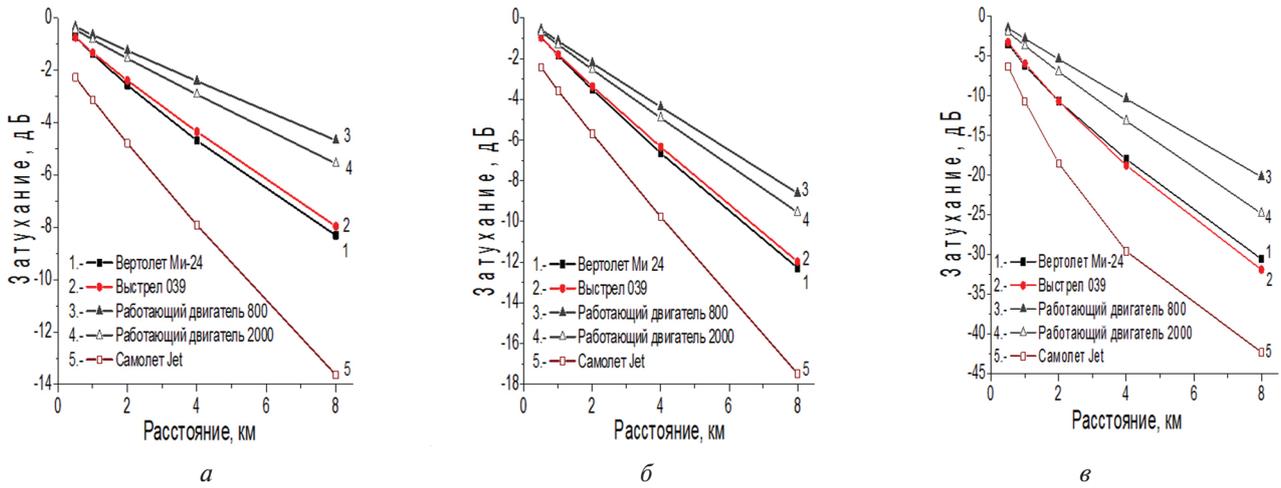


Рис. 6. Затухание акустического излучения в атмосфере: а – температура 10, влажность 70%; б – температура 20, влажности 70%; в – температуре 15, влажности 20%; 1 – вертолет Ми-24, 2 – выстрел орудия, 3 – дизельный двигатель 800 об./мин, 4 – дизельный двигатель 2000 об./мин, 5- Самолет Jet

ности. При практических расчетах необходимо учитывать, что рядом с источником излучения затухание должно быть равно 0. Поэтому коэффициент γ_0 при проведении практических расчетов целесообразно брать $\gamma_0 \approx 0$.

При распространении акустического сигнала вблизи земной поверхности, помимо учета поглощения в атмосфере, необходимо учитывать влияние отражения сигнала от поверхности земли. Остановимся на этом моменте подробнее.

Влияние земной поверхности на затухание звука. Интерференция сигналов, приходящих непосредственно от источника шума в приемник и после отражения от поверхности земли с находящимися на ней элементами растительности, может приводить к интерференционному ослаблению принимаемого звукового давления.

При падении плоской звуковой волны на плоскую границу раздела двух сред с плотностями ρ, ρ_1 и скоростями распространения c, c_1 коэффициент отражения F определится через импеданс падающей Z и прошедшей во вторую среду Z_1 волн [28]:

$$F_0 = \frac{Z_1 - Z}{Z_1 + Z}, \tag{8, a}$$

где $Z = \rho c / \cos\theta, Z_1 = \rho_1 c_1 / \cos\theta_1$.

При нормальном падении волны на плоскую границу $\theta = \theta_1$ имеем

$$F_0 = \frac{\rho_1 c_1 - \rho c}{\rho_1 c_1 + \rho c}. \tag{8, б}$$

Коэффициент отражения зависит не от скоростей звука и плотностей сред в отдельности, а от их произведений $\rho_1 c_1, \rho c$, называемых волновым сопротивлением или характеристическим импедансом сред [28, 29]. В случае, когда коэффициент преломления $n = \frac{c_1}{c} \neq 1$, а $\theta \rightarrow \pi/2$ (скользящее падение), получаем: $F_0 \rightarrow -1$. Если F_0 – коэффициент отражения от гладкой поверхности, то коэффициент зеркального отражения для неровной поверхности из того же материала можно представить как [30, 31]:

$$F = F_0 \rho_S. \tag{9}$$

Коэффициент отражения ρ_S определяет среднеквадратичное значение поля, возникающее в результате отражения без учета сильных возмущений, значительными неровностями поверхности. Его значение для акустических полей можно определить по аналогии со значением для электромагнитных полей [30]:

$$\rho_S^2 = \exp \left\{ - \left(\frac{4\pi\sigma_h \sin \psi}{\lambda} \right)^2 \right\}. \tag{10}$$

Таблица 5

Коэффициенты линейной регрессии аппроксимации зависимости интегрального затухания в атмосфере от дальности для различных источников шума

Источник звука	Коэффициенты аппроксимации	Самолет Jet	Вертолет Ми-24	Выстрел	Дизельный двигатель 800 об/мин.	Дизельный двигатель 2000 об/мин.
температура=10, влажность=70%	γ_0	-1,66	-0,43	-0,39	-0,078	-0,17
	γ_1	-1,51	-1,00	-0,96	-0,58	-0,68
температура=20, влажность=70%	γ_0	-1,60	-0,39	-0,36	-0,073	-0,15
	γ_1	-2,00	-1,50	-1,46	-1,069	-1,18
температура=15, влажность=20%	γ_0	-6,94	-2,79	-2,40	-0,32	-0,72
	γ_1	-4,69	-3,55	-3,78	-2,49	-3,03

В этой формуле σ_h — обозначает среднеквадратичное значение высот неровностей поверхности, ψ — угол переотражения, а λ — длина волны.

В тех случаях, когда реальная поверхность заменяется при расчетах плоской поверхностью, угол переотражения будет равен:

$$\psi \approx \frac{h_T + h_r}{R} \quad (11)$$

где h_T — высота источника, h_r — высота приемника R — расстояние между ними.

Тогда множитель ослабления поверхности акустического сигнала в рамках двухлучевой модели:

$$V = \sqrt{1 + 2F \cos\left(\frac{4\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) + F^2} \quad (12)$$

При $\left(\frac{4\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) \rightarrow 0$. $F_0 \rightarrow -1$, и $F \approx -1 + \delta$, тогда

$$V \approx 2\rho_S \left| \sin\left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) \right| \approx 2\rho_S \left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right). \quad (13)$$

Множитель ослабления интенсивности (мощности) акустического сигнала с учетом, что $\rho_S \approx 1$, можно записать:

$$V^2 \approx 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) \approx 4 \left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right)^2 = 4 \left(\frac{2\pi h_T h_r f}{AR}\right)^2. \quad (14)$$

Первый максимум поля будет располагаться на дальности:

$$R = \frac{4h_T h_r f}{c}, \quad (15)$$

где f, c — частота и скорость распространения звука в воздухе.

Используя для расчетов множителя ослабления поверхности раздела выражения (8–12), можно определить спектр сигнала акустического источника излучения $S_r(f, R, h_r, h_T)$ на дальности R с учетом потерь при распространении в атмосфере $L(f, R)$ и влияния подстилающей поверхности Земли $V(f, R, h_r, h_T)$:

$$S_r(f, R, h_r, h_T) = S_T(f) L(f, R) V(f, R, h_r, h_T). \quad (16)$$

С учетом (16) и (6) можно определить интегральный множитель ослабления $V_1(\bullet)$ акустического сигнала за счет атмосферы и подстилающей поверхности при распространении на расстояние R .

Значения множителя ослабления поверхности на разных частотах для различной степени шероховатости и при разных высотах расположения источника звука приведены на рис. 7.

Они рассчитаны с использованием соотношений (9–12). Высота в 50 м характерна для низколетящих самолетов и вертолетов, а 1...1.5 м — соответствуют высоте расположения источника звука для объектов наземной техники. Видно, что при увеличении степени шероховатости поверхности уменьшается глубина интерференционных провалов. Для более высокочастотных компонент звука разрушение зеркального ме-

ханизма рассеяния происходит раньше, чем для низкочастотных компонент.

Из приведенных данных следует, что интерференционное ослабление звука поверхностью земли необходимо учитывать для наземной техники и низколетящих (с высотами 50...100 м) летательных аппаратов. При больших высотах полета им можно пренебречь для дистанций, на которых может осуществляться акустическое обнаружение.

Видно, что возрастание среднеквадратичной высоты неровностей приводит к более раннему разрушению интерференционной структуры поля. Для объектов гусеничной и колесной техники (высота источника звука 1...2 м) уже с дальностей в единицы метров для низких частот звука, десятки метров для средних и сотни метров для высоких частот начинается интерференционная область. В ней множитель ослабления поверхности квадратично убывает с дистанцией. В этой зоне шероховатость поверхности не влияет на его значение. На дальностях более километра обнаружение объектов наземной техники осуществляется в зоне глубокого интерференционного замирания сигнала. В силу существенно большей широкополосности источников акустического шума по сравнению с объектами радиолокационного наблюдения значительно отличается и влияние поверхности раздела на различные участки спектра излучаемого шума. Сильнее за счет поверхности подавляются низкочастотные компоненты и меньше высокочастотные. Это необходимо учитывать при оценке интегрального множителя ослабления для каждого конкретного источника шума.

Результаты оценки интегральных значений множителя ослабления поверхности для различных источников шума показаны на рис. 8.

Видно, что для воздушных объектов затухание сигнала из-за влияния поверхности раздела невелико, в тоже время для объектов наземной техники оно может превышать 25 дБ и это необходимо учитывать при расчетах.

Дальность действия систем акустической разведки. Эквивалентный уровень звукового давления с подветренной стороны $P_1(R)$ на приемнике в логарифмическом масштабе можно рассчитывать для каждого точечного источника в логарифмическом масштабе с учетом уравнения радиолокации и соотношений (6), который может быть записан в виде:

$$P_1(R) = P_0 + G - L, \quad (17)$$

где P_0 — уровень звуковой мощности точечного источника шума относительно опорного значения звуковой мощности, равного 1 пВт, дБ; G — поправка, учитывающая направленность точечного источника шума и показывающая, насколько отличается эквивалентный уровень звукового давления точечного источника шума в заданном направлении от уровня звукового

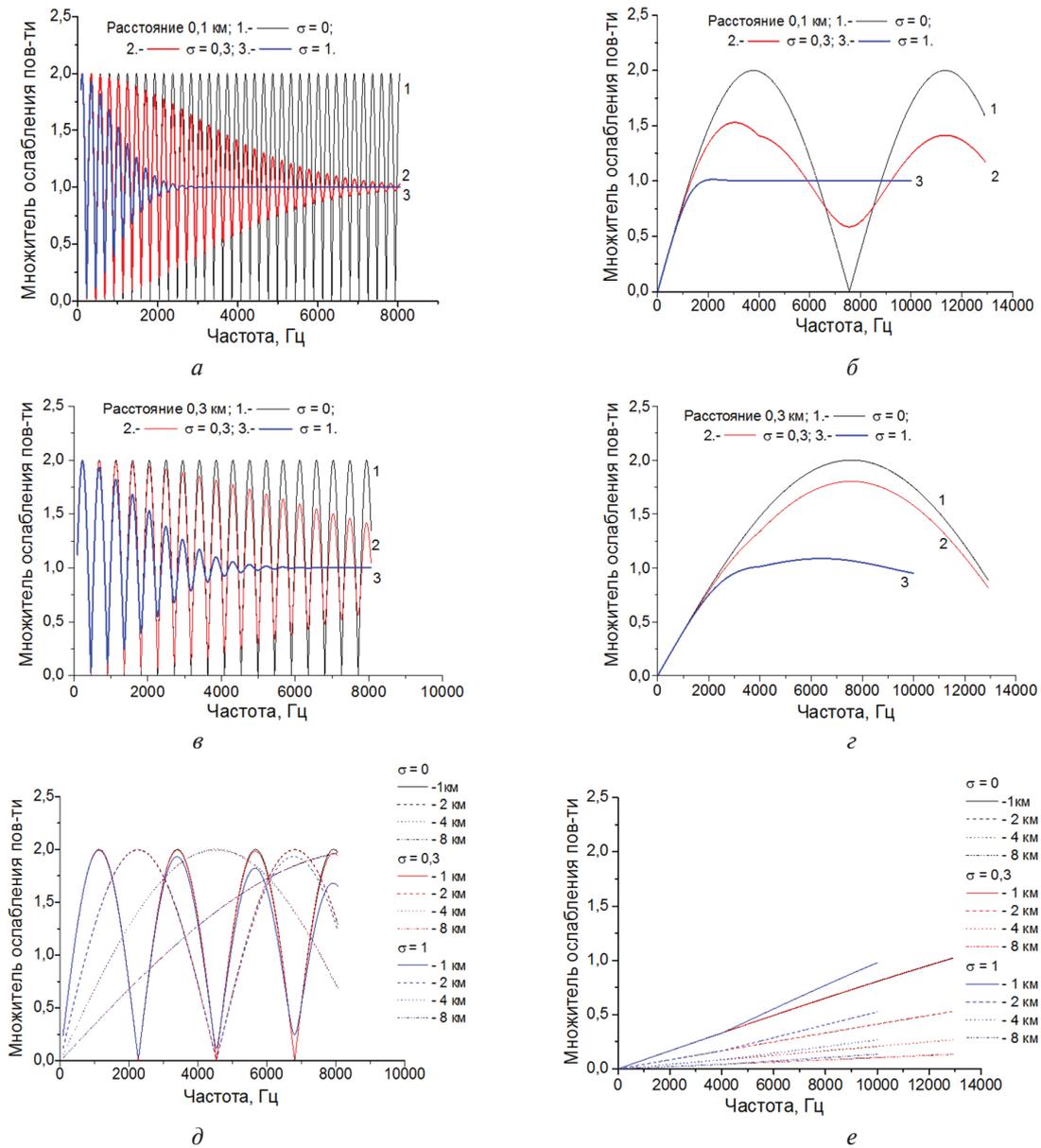


Рис. 7. Зависимости множителя ослабления поверхности на разных дистанциях от источника звука для разных частот в зависимости от степени шероховатости поверхности: *a, б, д* – летательные аппараты с высотой полета 50 м, наземная техника – *в, з, е*; *a, в* – дальность 0, 1 км; *б, з* – дальность 0,3 км; *д, е* – дальности 1...8 км; 1 – $\sigma \approx 0$, 2 – $\sigma \approx 0,3$ м, 3 – $\sigma \approx 1$ м

давления ненаправленного точечного источника шума с тем же уровнем звуковой мощности P_0 , дБ. L – затухание при распространении звука от точечного источника шума к приемнику с учетом влияния всех факторов, дБ.

Затухание $L(R)$ в формуле (17) рассчитывают по формуле (18)

$$L(R) = L_{div}(R) + L_{atm}(R) + V_{gr}(R, h_r, h_T) + L_{bar} + L_{misc}, \quad (18)$$

где $L_{div}(R)$ – затухание из-за геометрической дивергенции (из-за расхождения энергии при излучении в свободное пространство); $L_{atm}(R)$ – затухание из-за звукопоглощения атмосферой; $V_{gr}(R, h_r, h_T)$ – затухание из-за влияния земли; L_{bar} – затухание из-за экранирования; L_{misc} – затухание из-за влияния прочих эффектов.

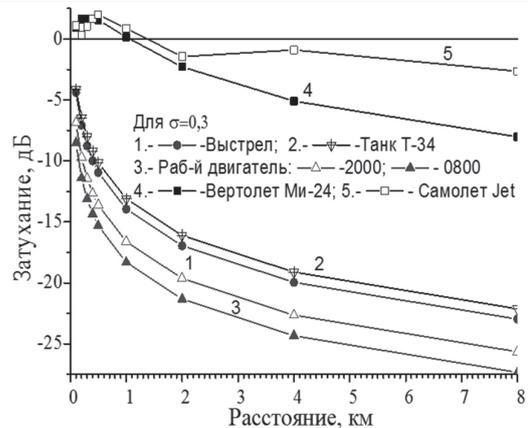


Рис. 8. Влияние поверхности раздела на затухание звука: 1 – выстрел орудия; 2 – танк Т-34; 3 – дизельный двигатель: 2000 об./мин, 800 об./мин; 4 – вертолет Ми-24; 5 – Самолет Jet

Затухание из-за геометрической дивергенции $L_{div}(R)$. Затухание из-за геометрической дивергенции (затухание в свободном пространстве из-за расхождения звуковой энергии) $L_{div}(R)$, дБ, происходящее в результате сферического распространения звука точечного источника шума в свободном звуковом поле, рассчитывают по формуле:

$$L_{div}(R) \text{ [дБ]} = 20 \lg(d/d_0), \quad (19)$$

где d – расстояние от источника шума до приемника, м; d_0 – опорное расстояние (обычно используется $d_0 = 1$ м).

С использованием данных об уровне шумов различных источников (табл. 6) и рассчитанных выше значений интегральных множителей ослабления атмосферы и подстилающей поверхности оценены дальности обнаружения объектов акустического излучения при различных метеоусловиях и внешних помехах. Они приведены в табл. 6. При расчетах полагалось, что для обнаружения необходимо превышение полезного сигнала над шумами примерно на 10 дБ.

Анализ показывает, что воздушные объекты, даже летящие на малых высотах (50 м), могут обнаруживаться при отсутствии помех или слабых помехах на дальностях более 8 км и только при низкой температуре и влажности дальность снижается до 5 км. При значительных помехах, создаваемых ветром и дождем, дальность обнаружения существенно падает и может быть менее 1 км. Звуки выстрела при слабых помехах или их отсутствии могут быть обнаружены на удалении более 8 км, а при сильных шумах за счет ветра или дождя обнаруживаются на дальностях 6..7 км, а при плохих метеоусловиях дальность может упасть до 3 км. Объекты наземной техники при отсутствии помех могут обнаруживаться на удалении в 4...6 км. В то же время при сильном ветре и дожде она будет менее 0,5 км. Дальности обнаружения оценены для нейтрального режима распространения звука (малых значений скорости ветра $V \leq 1$ м/с и градиентов температур $g \leq 1$ град/км), а также без учета турбулентности в пограничном слое атмосферы. Учет влияния этих факторов на дальность действия акустических систем будет предметом рассмотрения в дальнейшем.

Таблица 6

Расчетные дальности обнаружения для разных атмосферных условий и типов внешних помех

	Самолет Jet			Вертолет Ми-24			Выстрел		
	Влияние атмосферы и поверхности			Влияние атмосферы и поверхности			Влияние атмосферы и поверхности		
	Без помехи	шелест листвы	ветер, дождь	Без помехи	шелест листвы	ветер, дождь	Без помехи	шелест листвы	ветер, дождь
темп.=10, вл.=70%	>8 км	>8 км	1,76 км	>8 км	>8 км	0,9 км	>8 км	>8 км	7,45 км
темп.=20, вл.=70%	>8 км	>8 км	1,7 км	>8 км	>8 км	0,87 км	>8 км	>8 км	6,5 км
Темп.=15, вл.=20%	7,3 км	5,7 км	1 км	7,7 км	5,93 км	0,66 км	>8 км	>8 км	3,4 км
	Влияние атмосферы			Влияние атмосферы			Влияние атмосферы		
темп=10, вл=70%	>8 км	>8 км	1,88 км	>8 км	>8 км	0,89 км	>8 км	>8 км	>8 км
темп=20, вл=70%	>8 км	>8 км	1,77 км	>8 км	>8 км	0,86 км	>8 км	>8 км	>8 км
темп=15, вл=20%	>8 км	>8 км	0,95 км	>8 км	>8 км	0,63 км	>8 км	>8 км	8,1 км
	Enginework0800			Enginework2000			Т-34		
	Влияние атмосферы и поверхности			Влияние атмосферы и поверхности			Влияние атмосферы и поверхности		
	Без помехи	шелест листвы	ветер, дождь	Без помехи	шелест листвы	ветер, дождь	Без помехи	шелест листвы	ветер, дождь
темп=10, вл=70%	>8 км	7,5 км	<0,5 км	>8 км	7,58 км	<0,5 км	>8 км	7 км	<0,5 км
темп=20, вл=70%	>8 км	6,4 км	<0,5 км	>8 км	=6,5 км	<0,5 км	>8 км	6,1 км	<0,5 км
темп=15, вл=20%	=6,44 км	4,3 км	<0,5 км	=5,9 км	=4 км	<0,5 км	=6,2 км	4 км	<0,5 км
	Влияние атмосферы			Влияние атмосферы			Влияние атмосферы		
темп=10, вл=70%	>8 км	>8 км	0,94 км	>8 км	>8 км	0,93 км	>8 км	>8 км	0,88 км
темп=20, вл=70%	>8 км	>8 км	0,91 км	>8 км	>8 км	0,9 км	>8 км	>8 км	0,85 км
темп=15, вл=20%	>8 км	>8 км	0,8 км	>8 км	>8 км	0,75 км	>8 км	>8 км	0,7 км

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из-за дисперсионных свойств атмосферы при увеличении расстояния до приемника происходит деформация спектра принимаемого сигнала. Поскольку сильнее затухают более высокочастотные компоненты звука, то происходит сужение его спектра. Причем снижение влажности и понижение температуры приводят к увеличению погонного затухания, наиболее сильно на высоких частотах.

2. Интерференционные явления при отражении звука от поверхности земли наиболее сильно сказываются на низких частотах, снижая интенсивность принятого сигнала. Шероховатость же поверхности сильнее сказывается на высоких частотах, где она приводит к снижению коэффициента отражения и, как следствие, уменьшению интерференционного влияния поверхности на интенсивность принимаемого сигнала.

3. Эффективная ширина спектра источников акустического шума, являющихся объектами акустической разведки сужается с увеличением дальности до источника. Изменения эффективной ширины спектра на уровне значимости 90% могут достигать 10 раз. Это будет приводить к ухудшению точности определения его местоположения.

4. Разработана методика оценки дальности обнаружения источников акустического излучения в условиях влияния затухания в атмосфере и интерференционного ослабления земной поверхности для нейтрального режима распространения в атмосфере. Теоретически показана возможность обнаружения объектов наземной и воздушной техники по их акустическому излучению на удаленностях в несколько километров.

5. Показана возможность описания спектров источников шума фрактальными зависимостями. Показано, что, в большинстве случаев скорость убывания спектральной плотности на крыльях спектра не превышает $n \approx 2$.

Литература

- [1] *Седышев Ю.Н.* Бистатистические шумовые радиолокаторы с когерентной пространственно–временной обработкой эхо-сигналов и активных помех / Ю.Н. Седышев, П.Ю. Седышев В.А. Тютюнник // Прикладная радиоэлектроника, Харьковский национальный Университет Радиоэлектроники (ХНУРЭ). – Т. 1. – № 2. – 2002. – С. 189–194.
- [2] *Лобочко С.Е.* Построение системы обнаружения с использованием излучения УКВ и ТВ–передатчиков / С.Е. Лобочко // Международная научная конференция «Излучение и рассеяние ЭМВ» ИРЭМВ*2003, труды конференции, Таганрог, 2003. – С. 287–290.
- [3] *Луценко И.В.* Бистатистические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона / И.В. Луценко, И.В. Попов, В.И. Луценко // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков. – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 193–204.
- [4] *Lutsenko I.V.* Illumination of Air Environment Using Radiation of SW Broadcasting stations / I.V. Lutsenko,

V.I. Lutsenko, I.V. Popov // The 5-th European Radar Conference, 30–31 October 2008: conf. proceedings. – Amsterdam, 2008. – P. 396–399.

- [5] *Луценко И.В.* Использование электромагнитных полей источников гражданского назначения для диагностики тропосферы и освещения воздушной обстановки / И.В. Луценко // 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ 2008), Международная конференция «Современные перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (СРРСН-2008) 22-24 октября, Харьков 2008 г.: сб. научн. тр. – Харьков, 2008. – Т. 1., Ч. 2. – С. 184–188.
- [6] *Попов И. В.* Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ диапазона / И.В. Попов, В.И. Луценко, И.В. Луценко // “Современные проблемы радиоэлектроники” Сборник научных трудов. Под редакцией Громыко А.И., Сарафанова А.В. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 25–28.
- [7] *Вичкань А.В.* Пассивная когерентная радиолокация в коротковолновом диапазоне. Часть 1. Обнаружение воздушных целей. / А.В. Вичкань, П.А. Мельяновский, А.И. Шуть // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 72–77.
- [8] *Виленчик Л.С.* Основы пассивной коротковолновой радиолокации Л.С. Виленчик П.А. Мельяновский, В.Н. Минаев // Радиотехника. – 2009, 311. – С. 61–66.
- [9] *Коршикова Ж.С.* Алгоритмы пеленгации и распознавания локализованных источников широкополосных излучений на фоне распределенных в пространстве помех: автореф. дис. на соискание научн. степени кандидата технических наук: спец. 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах) / Ж.С. Коршикова. – М., 2010. – 16 с.
- [10] *Красько А.С.* Поддержка принятия решений по обеспечению общественной безопасности на городских территориальных объектах на основе оперативного анализа аудиоинформации: автореф. дис. на соискание научн. степени канлилата технических наук: спец. 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах / А.С. Красько. – Уфа, 2011. – 16 с.
- [11] *Смирнов В.* Маскировка подвижных наземных объектов в современных условиях // Электронный ресурс. – http://samlib.ru/s/smirnow_wasilij/masikirovka.shtml. – 2013
- [12] *Анипко О.Б.* Комплексная проблема поиска и обнаружения наземных целей для их поражения вооружением, установленным на объектах бронетехники / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков, Ю.М. Бусяк // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. 2011. – Вип. 2 (18). – С. 43–47.
- [13] *Мокрушин Д.* Акустические системы обнаружения / Д. Мокрушин // Электронный ресурс. – <http://twower.livejournal.com/502014.html?thread=14595326>.
- [14] Акустические радары времен Второй мировой войны // Электронный ресурс. – <http://ww2history.ru/3901-akusticheskie-radary-vremen-vtoroj-mirovoj.html>
- [15] *Лобанов М.М.* Развитие советской радиолокационной техники / М.М. Лобанов // М.: Воениздат, 1982. – 240 с.

- [16] Самохин В.Ф. Шум ГТД (Введение в авиационную акустику) / В.Ф. Самохин // Московский авиационный институт. – М.: 2007. – 152 с.
- [17] Бирюков И.Ю. Акустическая компонента разведки наземных целей. Проблемы и решения / И.Ю. Бирюков // Харьков: Збірник наукових праць СНУЯ-ЕтаП 2013. – С. 98–104.
- [18] Дивизинюк М. О проблеме расчета дальности приёма акустической информации с открытых площадок / М. Дивизинюк, Ю. Гончаренко, Д. Гончаренко // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення захисту інформації в Україні. – 2012, 1 (23). – С. 29–35.
- [19] Системы обнаружения снайперов противника // Электронный ресурс. – <http://newsmilitary.narod.ru/VN-antisniperteh.html>
- [20] Карлов В.Д. Применение мощных сверхширокополосных акустических импульсов в системах радиоакустического зондирования / В.Д. Карлов, Ю.Н. Ульянов, В.Л. Мисайлов, Н.Г. Максимова // Системы обработки информации, 2010, выпуск 6 (87). – С. 95–100.
- [21] Веретенников А.И. Харьковское конструкторское бюро по машиностроению имени А.А. Морозова / А.И. Веретенников, И.И. Рассказов, К.В. Сидоров, Е.И. Решетило под ред. М.Д. Борисюка. – Харьков, 2007. – 188 с.
- [22] Кириченко В. А. Экспериментальное определение информативных признаков для радиолокационного распознавания наземных и надводных объектов / В. А. Кириченко, В. И. Луценко // Техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков, 1993. – С. 5–18.
- [23] Шум затухание звука при распространении на местности, часть 2. Общий метод расчета. Межгосударственный стандарт, ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613 –2:1996). – М.: Стандартинформ, 2006. – 42 с.
- [24] Шум. Расчётная модель Руководство пользователя / ООО «ЭКОцентр», Soft.eco-c.ru. – 2012. – 19 с. Транспортный шум – экологическая проблема № 1 для крупных городов.
- [25] Транспортный шум – экологическая проблема № 1 для крупных городов / Электронный ресурс.
- [26] Ломова Е.И. Экологические проблемы крупных городов / Е.И. Ломова // Электронный ресурс <http://festival.1september.ru/articles/584295/>.
- [27] Акустическое оружие / Электронный ресурс <http://alexsnews.com/ploxoe/2012/01/akusticheskoe-oruzhie/>
- [28] Исаакович М.А. Общая акустика. М.А. Исакович. Учебное пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 495 с.
- [29] Бреховских Л.М. Акустика слоистых сред / Л.М. Бреховских, О.А. Годин // М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 416 с.
- [30] Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард / Пер с англ. под ред. М.М. Вейсберна. – М.: Сов. Радио, 1976. – 392 с.
- [31] Справочник по радиолокации / Под. ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1976, Т. 1. – 455 с.
- [32] О.В. Кудрявцев. Сравнительный анализ акустических способов пеленгации // Электронный ресурс. http://sound-theory.ru/Articles/sravnitelnyj_analiz_metodov_pelengacii.pdf.

Поступила в редколлегию 20.04.2015



Луценко Владислав Иванович, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: распространение и рассеяние радиоволн, дистанционное зондирование природных сред, радиолокация.

Луценко Ирина Владиславовна, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: дистанционное зондирование тропосферы Земли с использованием излучения наземных и спутниковых радиосистем, исследование обратного рассеяния радиоволн СВЧ и КВЧ подстилающими поверхностями, гидрометеорами и антропогенными образованиями.



Соболяк Александр Васильевич, начальник отдела электрооборудования, Государственное предприятие Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова. Научные интересы: радиолокация, разработка радиотехнических систем и комплексов в акустическом и радиодиапазонах.



УДК 621.396.96:621.271.029.65

Дальність дії систем акустичної розвідки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2015. – Том 14. – № 2. – С. 125–136.

У статті оцінено дальність дії систем акустичної розвідки, що використовують власне випромінювання наземних (транспортних засобів, людей) і аеродинамічних (літаки і вертольоти) об'єктів. Розглянуто вплив на спектри випромінювання атмосфери і підстилаючої поверхні. Для типових об'єктів розвідки отримано значення множника загасання для різних метеорологічних умов.

Ключові слова: дальність дії, акустична розвідка, аеродинамічні об'єкти, власне випромінювання.

Табл.: 6. Іл.: 8. Бібліогр.: 32 найм.

UDC 621.396.96:621.271.029.65

The range of action of acoustic intelligence systems / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, A.V. Sobolyak // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2015. – Vol. 14. – № 2. – P. 125–136.

The paper estimates the range of action of acoustic intelligence systems which use intrinsic radiation of land (vehicles, people) and aerodynamic (planes and helicopters) objects. Influence on spectra of the atmosphere radiation and underlying surface is considered. Values of attenuation factor for standard objects under observation in different meteorological conditions are obtained.

Keywords: range of action, acoustic intelligence system, aerodynamic objects, intrinsic radiation

Tab.: 6. Fig.: 8. Ref.: 32 items.