

Д. А. ВЕЛИЧКО, канд. техн. наук, Г.И. СИДОРОВ, канд. техн. наук, Я.Г. СИДОРОВ

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН АКУСТИЧЕСКИМ ПАКЕТОМ

В последнее время задачи диагностики метеорологических параметров нижнего слоя атмосферы часто решаются с помощью систем радиолокационно-акустического зондирования (РАЗ) [1]. В этих системах используются свойства взаимодействия акустических и электромагнитных волн со средой распространения, в частности, зависимости параметров распространения звуковой волны от давления, температуры, вязкости, состава среды распространения и других параметров. Одновременное комбинированное использование свойств радио- и акустических волн, которые распространяются в одном и том же объеме, позволяет значительно улучшить характеристики систем диагностики [2]. В получившей широкое распространение схеме построения систем РАЗ акустическая волна излучается в исследуемую область пространства и модулирует плотность среды, через которую она проходит. Одновременно этот объем облучается радиоволной, которая рассеивается на образовавшихся неоднородностях, отличающихся по своим радиофизическим характеристикам от аналогичных по размерам участков невозмущенной среды. Из рассеянной электромагнитной волны, принятой приемником РЛС, выделяется информация о среде распространения. Это позволяет использовать акустический пакет в качестве практически безынерционного датчика, характеристики которого определяются на основе закономерностей взаимодействия со средой распространения как акустической, так и радиоволны.

Результаты проведенных исследований [1, 2, 3] позволили установить характеристики, с помощью которых могут быть определены сигналы, поступающие в радиоприемник вследствие рассеяния на неоднородностях, вызванных звуковой волной. Однако при определении мощности принятого системой РАЗ радиосигнала отсутствует такой широко используемый в радиолокации параметр, как эффективная поверхность рассеяния объекта (ЭПР), который входит в основную формулу радиолокации [4]. Этот параметр был введен первоначально как феноменологический, но оказался очень полезным и широко применяется для определения основных характеристик радиолокатора. Использование этого параметра позволит включить методы расчета РЛС в решение задач по определению характеристик систем РАЗ. Поэтому целью данной работы является определение эффективной поверхности рассеяния акустического пакета, на неоднородностях которого формируется сигнал, поступающий в радиоприемник РАЗ.

В качестве ЭПР будет использоваться величина  $\sigma = 4\pi \cdot r^2 \cdot \bar{S}^r / \bar{S}^i$ , где  $\bar{S}^r$  – вектор Умова-Пойнтинга радиоволны, падающей на объект,  $\bar{S}^i$  – вектор Умова-Пойнтинга обратной волны, принимаемой РЛС (см. [4]). При радиоакустическом зондировании объект отражения – пакет уплотнений не может считаться «точечным», фазовая поверхность радиоволны не является плоской, однако основное условие – синфазное сложение радиоволн, отраженных разными участками сферических поверхностей акустического пакета, будет выполняться в силу выполнения условий дифракции Брэгга для основной схемы зондирования ( $\lambda_e = 2\lambda_s$ , длина волны электромагнитного поля в 2 раза больше длины акустической волны).

Следует также отметить, что при работе систем РАЗ за счет сферичности поверхностей происходит частичная фокусировка рассеянных радиоволн, в связи с чем интенсивность принятого сигнала убывает с ростом расстояния  $r$  пропорционально  $1/r^2$ , а не  $1/r^4$ , как в моделях Сверлинга и Маркума. Отметим одно важное обстоятельство, которое может быть оценено как принципиальное отличие искомой величины ЭПР от параметра, используемого в радиолокации. В радиолокационных системах фазовый фронт волны, облучающей объект,

принимается плоским, в системах РАЗ в пределах дальностей, на которых формируется отражённый сигнал, такое предположение неверно. Однако требование плоского фазового фронта волны в радиолокации определяет синфазность возбуждения вторичных источников на поверхности наблюдаемого объекта, а в системах РАЗ выполнение такого требования обеспечивается геометрическим расположением акустической и радиоантенн в непосредственной близости друг от друга. В результате сферические фронты акустической и радиоволн практически совпадают и фактически выполняются требования, предъявляемые в радиолокации при облучении точечных объектов.

В качестве исходного соотношения, с помощью которого может быть решена поставленная задача, используем формулу для мощности принятого сигнала  $P_r$ , полученную в работе [2] и хорошо согласующуюся с результатами эксперимента

$$P_r = G_t \cdot G_r \cdot G_s \cdot B \cdot N^2 \cdot P_e \cdot P_s \left[ 1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{-0,1 \delta \cdot r}}{r^2}, \quad (1)$$

где  $P_r$  – мощность принятого радиосигнала (Вт);  $P_s$  – излучаемая акустическая мощность (Вт);  $N$  – число длин волн в акустическом пакете;  $\theta$  – наименьший из углов раскрытия диаграмм направленности звуковой и радио антенн (град);  $r$  – средняя дальность зондирования (м);  $\delta$  – коэффициент ослабления (по мощности) акустической волны ( $\text{дБ/м}$ );  $B$  – коэффициент, определяемый точностью выполнения условия Брэгга в пределах пакета, в предельном случае  $B = 1$ ;  $G_t$  – коэффициент усиления передающей радиоантенны;  $G_r$  – коэффициент усиления приемной радиоантенны;  $G_s$  – коэффициент усиления акустического излучателя. Как следует из физических механизмов и из приведенного соотношения, акустический пакет, ЭПР которого будет определяться, является коническим, имеет угол  $\theta$ , мощность звуковой волны, модулирующей плотность среды распространения, затухает, глубина пакета определяется числом  $N$  длин волн.

Затухание акустического пакета вызвано снижением мощности звуковой волны и связано со снижением плотности потока мощности при увеличении дальности, с процессами молекулярного (релаксационного) поглощения, с рассеянием за счет турбулентности, с рассеянием на примесях и другими процессами. Примем, как и в работе [3], что интенсивность  $J$  монохроматической волны на некотором расстоянии  $r$  от источника излучения может быть записана в следующем виде:

$$J = J_0 \exp(-\alpha r), \quad (2)$$

где  $J_0$  – начальная интенсивность звука;  $\alpha$  – коэффициент ослабления звука, который в общем случае равен сумме коэффициентов поглощения и рассеяния.

Коэффициент классического поглощения звука, обусловленного вязкостью и теплопроводностью воздуха, определяется формулой [3]:

$$\alpha = \frac{53,54 \cdot \eta \cdot f^2}{p \cdot C_s}, \text{ м}^{-1},$$

где  $\eta$  – вязкость воздуха;  $p$  – атмосферное давление;  $C_s$  – скорость звука;  $f$  – частота звука.

Для обычных атмосферных условий количественная оценка коэффициента поглощения может быть получена из следующего соотношения:

$$\alpha \approx 4,24 \cdot 10^{-11} f^2, \text{ м}^{-1} = 4,24 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{C_s^2}{\lambda_s^2} = \frac{1,9 \cdot 10^{-5}}{\lambda_s^2}, \text{ м}^{-1}. \quad (3)$$

Величина погонного затухания акустической волны  $\delta$  (дБ/м) может быть получена из формулы (2) с учётом (3):

$$\delta = 10\alpha \lg e.$$

Как видно из полученных соотношений, вследствие интенсивного затухания в воздушной среде плотность элементов акустического пакета быстро убывает, отражательная способность уплотнений также резко уменьшается. В первом приближении используем полученные соотношения только для определения границ отражающей области. Для упрощения расчетов будем считать, что в пределах анализируемого акустического пакета плотность постоянна, а в основной формуле радиолокации в качестве расстояния используем дальность до центра пакета.

Удобной характеристикой радиолокационной системы, учитывающей свойства среды распространения зондирующего сигнала, является энергетический потенциал, определяемый по формуле

$$\frac{P_r}{P_e} = G_1 G_2 G_3 B N^2 P_s \left[ 1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{-0,1\delta r}}{r^2}. \quad (4)$$

Эффективная площадь рассеяния  $\sigma_{эф}$  акустического пакета может быть найдена из формулы (1), если ее привести к стандартному виду, принятому в радиолокации

$$P_r = \frac{P_e \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda_e}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \sigma_{эф} = \frac{P_e \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda_e}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot B N^2 P_s G_3 \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \times \\ \times \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{-0,1\delta r} \cdot (4\pi)^3 r^2}{\lambda_e^2}.$$

Тогда

$$\sigma_{эф} = B N^2 P_s G_3 \left[ 1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{-0,1\delta r} \cdot (4\pi)^3 r^2}{\lambda_e^2}. \quad (5)$$

Удельная эффективная площадь рассеяния акустического пакета может быть вычислена по формуле

$$\sigma_{уд} = \frac{\sigma_{эф}}{V}, \quad (6)$$

где  $V$  – объем акустического пакета, который в свою очередь может быть вычислен как объем усеченного конуса вдоль трассы зондирования

$$V = \frac{\pi h}{3} (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2),$$

где  $h$  – высота конуса,  $R_1$  – радиус большего основания,  $R_2$  – радиус меньшего основания.

Высота конуса  $h$  определяется пространственной протяженностью акустического пакета, зависящей от длины акустической волны  $\lambda_s$  и числа волн в пакете

$$h = N\lambda_s.$$

Радиусы конуса  $R_1$  и  $R_2$  определяются по формулам

$$R_1 = \left( r + \frac{h}{2} \right) \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2}, \quad R_2 = \left( r - \frac{h}{2} \right) \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2},$$

где  $\theta$  – ширина диаграммы направленности акустического излучателя.

При радиоакустическом зондировании должно выполняться условие Брэгга  $\lambda_s = \lambda_e/2$ , поэтому формула для определения объема акустического пакета имеет вид

$$V = \frac{\pi N \lambda_e}{6} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left[ \left( r + \frac{N \lambda_e}{4} \right)^2 + \left( r - \frac{N \lambda_e}{4} \right)^2 + \left( r + \frac{N \lambda_e}{4} \right) \left( r - \frac{N \lambda_e}{4} \right) \right].$$

По вышеприведенным формулам выполнены оценочные расчеты энергетического потенциала системы радиоакустического зондирования, предназначенной для диагностики воздушной среды на малых расстояниях до 30 м в СВЧ и КВЧ диапазонах, эффективной поверхности рассеяния акустического пакета и её удельной величины при следующих технических характеристиках системы:  $N = 100$ ;  $\theta = 2^\circ$ ;  $P_s = 1 \text{ Вт}$ ;  $B = 1$  (считаем, что условие Брэгга точно выполняется во всём объёме зондирования),  $\lambda_e = 0,5; 1; 2; 3 \text{ см}$ .

Результаты расчетов приведены на графиках рис. 1...3.

На рисунке 1 приведена зависимость энергетического потенциала  $P_r / P_e$  от длины электрической волны  $\lambda_e$  и расстояния зондирования  $r$ , вычисленная по формуле (4). На рис. 2 приведена зависимость эффективной поверхности рассеяния  $\sigma_{\text{эф}} [\text{м}^2]$  от длины электрической волны  $\lambda_e$  и расстояния зондирования  $r$ , вычисленная по формуле (5). На рис. 3 приведена зависимость удельной поверхности рассеяния  $\sigma_{\text{уд}} [\text{м}^{-1}]$  от длины электрической волны  $\lambda_e$  и расстояния зондирования  $r$ , вычисленная по формуле (6). На этих рисунках параметром кривых является длина волны, обозначенная:

—  $\lambda_e = 3 \text{ см}$ ;  $\cdots$   $\lambda_e = 2 \text{ см}$ ;  $--$   $\lambda_e = 1 \text{ см}$ ;  $- \cdot -$   $\lambda_e = 0,5 \text{ см}$

Для высокоточных измерений параметров отражённого радиосигнала необходимо иметь соотношение сигнал/шум на входе приёмника не менее 30...40 дБ. Мощность внутренних тепловых шумов в приёмнике определяется по формуле

$$P_{\text{ш}} = k T^k \Delta f \text{Ш} \gamma,$$

где Ш – коэффициент шума приёмника;

$\gamma$  – коэффициент потерь;

$\Delta f$  – эффективная ширина полосы пропускания.

При использовании непрерывного электромагнитного излучения и следящем приёме ширина полосы пропускания  $\Delta f$  не превышает 1000 Гц, коэффициент шума  $\text{Ш} \leq 2$ ,  $\gamma \leq 5$ ,  $T^k = 300 \text{ К}$ . Тогда  $P_{\text{ш}} \leq 4,2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$ .

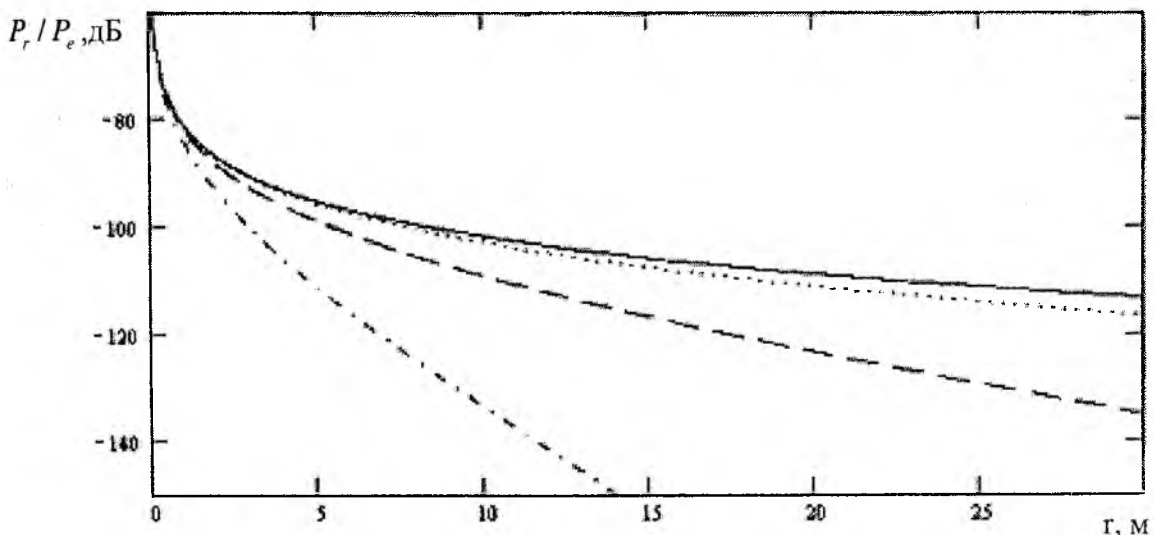


Рис.1

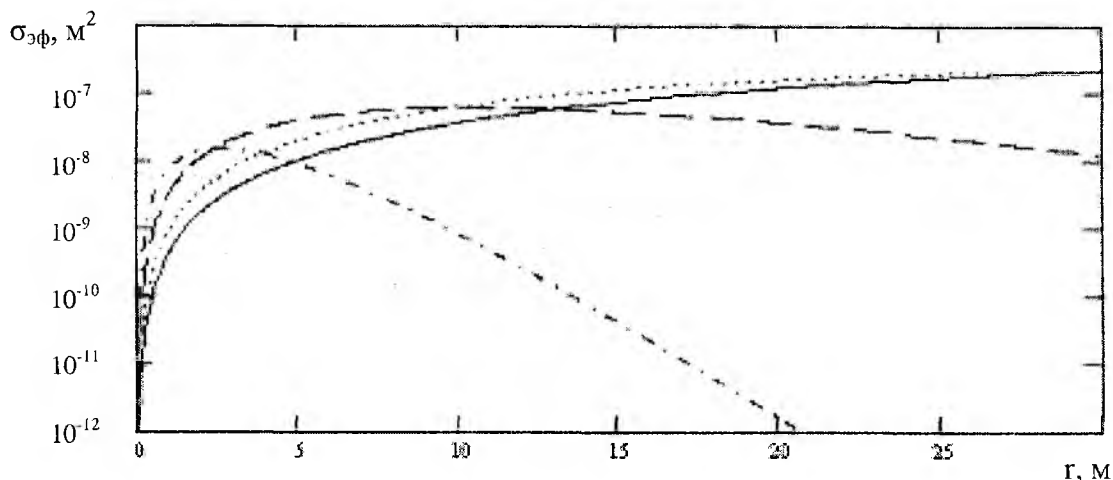


Рис.2

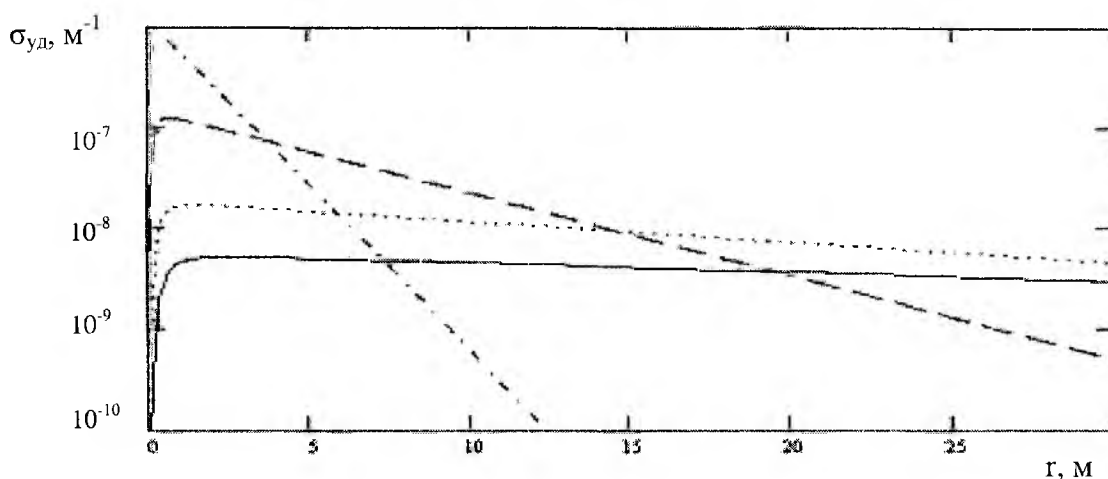


Рис.3

Сравнивая значения  $P_{ин}$  с расчётными значениями энергетического потенциала системы (рис.1), можно сделать вывод, что необходимое отношение сигнал/шум 30...40 дБ на дальностях до 30м обеспечивается при использовании электромагнитных волн длиной 1см и более и мощности радиопередатчика более 0,1 Вт.

Таким образом, для «основной» схемы РАЗ на основе данных о физических характеристиках среды распространения радиоволн, таких как сумма коэффициентов поглощения и рассеяния звука, вязкость и давление исследуемой среды, интенсивность и частота звуковых колебаний могут быть определены эффективная площадь рассеяния радиоволн акустическим пакетом и удельная величина этой характеристики. Предложены соотношения для количественных оценок этих величин. Численными методами получены оценки зависимостей отношения излучаемой и принимаемой мощности, эффективной поверхности рассеяния радиоволн акустическим пакетом и ее удельной величины от длины применяемой радиоволны и среднего расстояния зондирования.

**Список литературы:** 1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука. 1985. 198 с. 2. *Marshall J.M. Peterson A.M., Barnes A.A.* Combined radar acoustic soundine system. // *Appl. Opt.*. 1972. Vol. 2, N 1, P.P. 108 – 112. 3. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука. 1986. 140 с. 4. *Распространение ультракоротких радиоволн.* Пер. с англ./ Под ред. Б.А. Шиллерова. М.: Сов. радио, 1954. 710 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 04.02.2002