

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯННЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО И РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

КАРТАШОВ В.М.

С использованием структурно-физической модели рассеяния волн в турбулентной атмосфере анализируются вероятностные характеристики рассеянных сигналов систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы. Предлагается алгоритм оценивания параметров турбулентности по пространственным характеристикам сигнала радиоакустических систем.

При синтезе алгоритмов обработки локационных сигналов и интерпретации результатов измерений необходимо иметь достоверные априорные сведения о сигнале, базирующиеся на физических представлениях и механизмах, в результате действия которых рассеянный сигнал формируется. Усредненные энергетические характеристики рассеянных сигналов систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы, получаемые усреднением по ансамблю рассеивающих полей, достаточно подробно изучены [1,2]. Однако воссоздать реальную картину рассеяния сигнала с учетом "мгновенной" структуры рассеивающего поля неоднородностей и фазовых соотношений различных спектральных составляющих в рамках таких представлений нельзя.

В связи с этим разработана структурно-физическая модель (СФМ) рассеяния [3], учитывающая существующую (не осредненную) реализацию случайного поля неоднородностей, его динамику, особенности брэгговского рассеяния. СФМ позволяет анализировать временные и пространственные характеристики полезного сигнала, особенности его спектра. Аналогично в классической радиолокации введение обобщенной энергетической характеристики цели- эффективной площади рассеяния- упрощает некоторые расчеты и качественные представления, но существенно сужает возможности анализа процесса рассеяния и характеристик рассеянного сигнала. Усреднением по ансамблю от СФМ можно переходить к распространенной в литературе энергетической модели, обратный переход в общем случае невозможен. В данной работе анализируются временные и пространственные статистические характеристики рассеянных волновых полей систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы с использованием СФМ.

Поле неоднородностей, рассеивающих в атмосфере акустический сигнал, в соответствии с СФМ [3], представляет собой совокупность квазисинусои-

дальных линейных решеток, оси которых ориентированы вдоль вектора рассеяния $\vec{b}$ (направлен вдоль оси x), а пространственный период при обратном рассеянии соответствует половине длины волны λ зондирующего сигнала. Амплитуды и начальные фазы решеток случайны и зависят только от структуры реальной среды. Каждую из решеток можно рассматривать как выборку узкополосного случайного процесса $\varepsilon_i(x)$. Радиус поперечной корреляции решеток в плоскости y, z $-\rho_k = \lambda/4$, число их I в рассеивающем объеме с поперечным размером L_1 : $I \approx \left(2L_1/\lambda\right)^2$.

Продолжительность существования в атмосфере эквивалентных структурных образований — рассеивающих решеток — значительно влияет на характеристики рассеянного сигнала и должна учитываться, хотя бы косвенно, при интерпретации полученных результатов измерений. В связи с этим оценим время существования эквивалентных структурных образований.

Время жизни τ неоднородностей с характерным пространственным размером l_1 можно представить как $\tau \approx l_1/u$, где u — скорость деформации (диссипации) неоднородностей с масштабом порядка l_1 .

Величина u^2 может быть определена путем интегрирования спектральной плотности энергии $E(k)$ в диапазоне от $k_1 = 2\pi/l_1$ до ∞ [4]. Как известно, для изотропной турбулентности в инерционной подобласти [1] $E(k) = B\gamma^{2/3}k^{-5/3}$, где B — безразмерная постоянная; γ — скорость диссипации энергии турбулентности. Тогда для масштабов $l \leq l_1$

$$u^2 = 2 \int_{k_1}^{\infty} B\gamma^{2/3} k^{-5/3} dk = 3B\gamma^{2/3} k_1^{-2/3}.$$

Время жизни неоднородности, за которое происходит ее существенное изменение (эволюция), определяется приближенной формулой

$$\tau \approx l_1/u = 1,1B^{-1/2}\gamma^{-1/3}l_1^{2/3}. \quad (1)$$

Отметим, что (1) с точностью до множителя $1,1B^{-1/2}$ совпадает с оценочной формулой, приведенной в [1].

Таким образом, время жизни неоднородности определяется ее размером (чем больше l_1 , тем больше τ) и интенсивностью турбулентности (обратная зависимость). Для значений $l_1 = 0,1m$ (соответствует длине рассеиваемой волны $\lambda = 0,2m$), $B = 1,4$ при $\gamma = 10^{-4} m^2 c^{-3}$ (очень слабая турбулентность) получим $\tau = 4,2c$. При $\gamma = 10^{-1} m^2 c^{-3}$ имеем $\tau = 0,42c$.

Условие "замороженности" рассеивающего поля применительно к зондированию атмосферы можно определить следующим образом: $\tau \gg \tau_s$, где τ_s —

длительность зондирующего сигнала. Следовательно, в диапазоне реальных значений параметров турбулентности и зондирующих сигналов рассеивающие решетки можно считать в первом приближении “замороженными”. В то же время, при сильной турбулентности и большом значении τ_s , с учетом того, что решетка состоит из большого числа неоднородностей, появившихся в разные моменты времени, можно ожидать, что эволюция среды способна оказать значимое влияние на характеристики рассеянного сигнала.

Для подтверждения адекватности СФМ и анализа ее особенностей применительно к акустическому и радиоакустическому зондированию рассмотрим далее влияние турбулентности на характеристики звуковой волны, распространяющейся в атмосфере. Анализ функции когерентности звуковой волны [1], распространяющейся в локально-изотропной среде с колмогоровским спектром показателя преломления, показывает, что поперечный радиус когерентности волнового поля определяется формулой

$$\rho_c = (0,73 C_s^2 q^2 r_0)^{-3/5}, \quad (2)$$

где C_s^2 — структурная характеристика поля показателя преломления ε для звуковой волны; $q = 2\pi/\lambda$ — волновое число; r_0 — пройденное волной расстояние. Под поперечным радиусом когерентности здесь понимаем средний размер области волнового фронта, в пределах которой флуктуации фазы волны находятся в допустимых пределах — на расстоянии ρ_c обеспечивается равенство единице структурной функции флуктуаций фазы $D(\rho_c) = 1$.

Продольная корреляция волнового поля вдоль направления зондирования оказывается существенно более сильной и влияние турбулентности сказывается в первую очередь на флуктуациях амплитуды волны. Продольный радиус когерентности волнового поля оценивается выражением [2]

$$L_c = \left(C_s^2 q^{7/6} r_0 \right)^{-6/5}. \quad (3)$$

С использованием (2), (3) производились оценки продольного и поперечного радиусов когерентности звуковой волны на различных дальностях при следующих значениях параметров:

$C_s^2 = 10^{-7} \text{ м}^{-2/3}$; $f = 1 \text{ кГц}$ — частота сигнала. Для сопоставления ниже приведены также соответствующие значения поперечного размера волны (волнового пучка) $\rho_0 \approx \varphi r_0$, где φ — ширина диаграммы направленности излучателя. При $\varphi = 5^0$ получаем $\rho_0 \approx 0,1 r_0$. В качестве характерного продольного размера можно использовать пространственную протяженность акустического импульса $r_s = C \cdot \tau_s$, где C — скорость звука, τ_s — длительность импульса. Для $\tau_s = 0,1 \text{ с}$ имеем $r_s \approx 34 \text{ м}$. Результаты расчетов сведены в таблицу.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что звуковая волна при распространении в

$r_0, \text{ м}$	$\rho_0, \text{ м}$	$\rho_c, \text{ м}$	$L_c, \text{ м}$
10	1	144	$2,7 \cdot 10^5$
100	10	36	$1,7 \cdot 10^4$
500	50	13,8	$2,5 \cdot 10^3$
1000	100	9,1	$1,1 \cdot 10^3$

турбулентной атмосфере на некотором расстоянии от источника может быть представлена в виде совокупности когерентных волновых столбов (решеток), причем число этих столбов с расстоянием увеличивается, а поперечный размер их уменьшается.

Амплитуда радиосигнала, отраженного от звуковой волны, распространяющейся в турбулентной атмосфере, с расстоянием существенно уменьшается вследствие того, что когерентное рассеяние радиоволны имеет место только в пределах столба. Сигналы, полученные от отдельных столбов, складываются не когерентно (по мощности). По мере увеличения количества таких столбов в пределах волнового пакета результирующий отраженный сигнал уменьшается. Именно этим обстоятельством объясняется зависимость мощности P_e отраженного радиосигнала от дальности r_0 в радиоакустическом зондировании как $P_e \sim r_0^{-26/5}$.

Сама же акустическая волна с расстоянием способности к дифракции на турбулентных неоднородностях не теряет. Поскольку в соответствии с СФМ рассеивающие периодические неоднородности распределены вдоль направления распространения волны и имеют небольшой поперечный размер, существенно меньший, чем поперечный радиус когерентности волны, то квазикогерентное рассеяние на каждой неоднородности не ослабевает. А сложение сигналов, рассеянных отдельными неоднородностями, как и на небольших расстояниях, происходит не когерентно. Действительно, из основного уравнения акустической локации [5] следует, что мощность P_s рассеянного сигнала зависит от расстояния, пройденного волной до области рассеяния, как $P_s \sim r_0^{-4}$, т.е. влияет только расходимость волны.

Если бы рассеяние акустической волны происходило на протяженных в поперечном направлении образованиях, то это привело бы к дополнительному ослаблению рассеянной волны с расстоянием. Справедливость же основного уравнения акустической локации многократно подтверждалась в экспериментах и сомнений не вызывает, а следовательно, СФМ правильно описывает механизм формирования рассеянной волны.

Использование СФМ позволяет анализировать свойства рассеянного сигнала: законы распределения мгновенных значений, флуктуаций огибающей и т.д. С одной стороны, данная модель позволяет получать новые сведения о сигнале, с другой, сопоставляя полученные результаты с априорными сведениями о рассеянных полях, известными в

литературе, можно оценивать адекватность модели либо достоверность имеющихся данных.

Закон распределения мгновенных значений акустического сигнала, рассеянного на турбулентных неоднородностях атмосферы, можно считать нормальным, основываясь на том, что результирующее колебание получается как сумма достаточно большого числа сигналов, отраженных отдельными решетками. Проанализируем свойства огибающей и квадратурных составляющих рассеянного сигнала. Зондирующее колебание будем полагать монохроматическим $S(t) = \text{Re}[e^{j\omega t}]$. Тогда, в соответствии с изложенными представлениями о рассеянии, принимаемый сигнал можно записать в виде

$$S_R(t) = \text{Re}\left\{\sum_{i=1}^I K_i \exp[j\omega(t - \tau_i)]\right\} = \text{Re}\{\dot{K} \exp[j\omega t]\},$$

где I — число решеток, находящихся в рассеивающем объеме; K_i — амплитудный коэффициент i -й решетки; $\omega\tau_i$ — член, учитывающий фазу i -й рассеивающей решетки; $\dot{K} = \sum_{i=1}^I K_i \exp(-j\omega\tau_i)$ — комплексная амплитуда рассеянного сигнала, которая в данном случае по определению равна комплексному коэффициенту рассеяния цели.

Вследствие механического перемещения и эволюции решеток значения K_i и τ_i флуктуируют, следовательно, параметр $\dot{K}$ также зависит от времени. Учитывая зависимость $\dot{K}$ от частоты, запишем: $\dot{K}(t, j\omega)$.

Распределения вероятностей комплексного коэффициента рассеяния $\dot{K}(t, j\omega)$ и его модуля являются важными характеристиками цели. Запишем $\dot{K}(t, j\omega)$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{K}(t, j\omega) &= K \exp(-j\theta) = A(t, \omega) + jB(t, \omega) = \\ &= \sum_{i=1}^I K_i \cos(\omega\tau_i) + j \sum_{i=1}^I K_i \sin(\omega\tau_i), \end{aligned}$$

где $K = |\dot{K}|$ и θ — соответственно модуль и аргумент комплексного коэффициента рассеяния, которые также являются случайными функциями t и ω ; $A = K \cos \theta$, $B = K \sin \theta$ — квадратурные составляющие.

A и B образуются в результате сложения большого числа слабо коррелированных составляющих с ограниченными мощностями (дисперсиями) и их можно считать независимыми и нормально распределенными. Поскольку коэффициенты решеток K_i примерно одного порядка, фазовые сдвиги достаточно велики, то дисперсии A и B одинаковы, а их математические ожидания равны нулю. Распределения вероятностей модуля $|\dot{K}|$ и огибающей результирующего сигнала являются релеевскими:

$P(K) = \frac{K}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{K^2}{2\sigma^2}\right)$. Фаза рассеянного сигнала распределена равномерно на интервале $[0, 2\pi]$, средняя мощность сигнала σ^2 равна дисперсии квадратурных составляющих.

При радиоакустическом зондировании атмосферы, особенно на малых дальностях, статистические свойства сигнала будут иными. На небольших дальностях, когда акустический волновой пакет (АВП) представляет собой единую когерентную структуру, рассеянный сигнал можно описать квазидетерминированной моделью с неопределенными параметрами.

Далее по высоте, когда вследствие действия турбулентности происходят рассмотренные выше изменения АВП, флуктуации огибающей подчиняются обобщенному распределению Релея. Характерная особенность такого рассеяния — существование регулярной (зеркальной) составляющей сигнала, физической основой формирования которой является группирование по фазе рассеивающих решеток (столбов) около некоторого доминирующего значения.

Рассмотрим пространственные характеристики рассеянных сигналов. Приведенные далее известные положения и соотношения из [1,2] хорошо объясняются изложенными модельными представлениями.

Угловой радиус корреляции ΔF акустического волнового поля, рассеянного совокупностью решеток, определяется угловым размером пучка, дифрагированного отдельной решеткой, $\Delta F = \lambda/L$. Линейный радиус корреляции в поперечном направлении рассеянного поля $\rho_{RK} = \lambda r_0/L$. С уменьшением длины решеток L направленность их излучения уменьшается, следовательно, значения ΔF и ρ_{RK} увеличиваются.

Диапазон частот Δf , в котором сохраняется корреляция рассеянного в обратном направлении сигнала, определяется шириной пространственного спектра решетки, т. е. значением параметра $2L$, $\Delta f \approx C/2L$. Спектральные составляющие зондирующего сигнала, выходящие за полосу Δf , рассеиваются на структурных образованиях с другим заполнением, следовательно, корреляция нарушается.

Электромагнитное поле, рассеянное акустическим волновым пакетом, имеющим когерентную структуру, представляет собой, как известно, сильно коррелированный в поперечном направлении волновой пучок, образующий на поверхности земли “пятно”. По мере распространения АВП в турбулентной атмосфере пятно “расплывается”, а поперечная пространственная корреляция рассеянного поля уменьшается.

Поскольку расширение пятна рассеянного сигнала вызвано влиянием турбулентности, а его размеры

для каждой высоты определяются интегральным значением C_s^2 в слое атмосферы, то этот факт можно использовать для оценки C_s^2 . Получим соответствующее выражение.

Средняя интенсивность рассеянного радиосигнала

J_R определяется формулой [2] $J_R = \frac{J_{R0}}{\left(1 + R_0^2 / \rho_c^2\right)}$, где J_{R0} — интенсивность отраженного сигнала в бестурбулентной атмосфере; R_0 — поперечный размер области взаимодействия электромагнитного и звукового пучков на расстоянии r_0 . Представив интенсивности в виде $J_{R0} = \frac{P}{S_0}$, $J_R = \frac{P}{S}$, где P — мощность рассеянного сигнала; S_0 , S — площади пятна в бестурбулентной и турбулентной атмосфере соответственно, запишем

$$\frac{J_R}{J_{R0}} = \frac{S}{S_0} = 1 + \frac{R_0^2}{\rho_c^2}. \quad (4)$$

Известны формулы [2] для диаметра пятна отраженного радиосигнала в бестурбулентной атмосфере $d_0 = (2a_s^2 + a_e^2)^{1/2}$, где a_s и a_e — радиусы акустической и электромагнитной передающих антенн, и параметра $R_0 = \frac{r_0^2}{k^2 d_0^2}$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda_e}$, λ_e — длина волны радиосигнала. Воспользовавшись известным представлением радиуса когерентности волны

(2), из (4) можно получить соотношение для определения C_s^2 по измеренному значению S :

$$C_s^2 = 0,227(S - S_0)^{5/6} r_0^{-8/3} \lambda_e^{1/3}.$$

Таким образом, СФМ адекватно отображает физические процессы, происходящие при рассеянии волн в атмосфере, и верно воспроизводит свойства рассеянных волновых полей. Полученные результаты могут использоваться при разработке феноменологических моделей, синтезе алгоритмов обработки полезных сигналов и интерпретации экспериментальных данных.

Литература: 1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с. 2. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 200 с. 3. Петров В.А., Карташов В.М. Анализ структурно-физической модели рассеяния волн в турбулентной атмосфере // Радиотехника. 2000. Вып. 114. С. 181-184. 4. Турбулентность: принципы и применения / Под ред. У. Фроста. М.: Мир, 1980. 535 с. 5. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 165 с.

Поступила в редколлегию 17.09.2000

Рецензент: д-р техн. наук Величко А. Ф.

Карташов Владимир Михайлович, канд. техн. наук, докторант ХТУРЭ. Научные интересы: методы дистанционного зондирования атмосферы. Увлечения: спорт, автомобиль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.:40-95-87.

УДК 621.317

МИНИМАЛЬНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

БУРДАКОВ С.Н., ВЕРЕЩАК А.П., ГУРЬЕВ В.Е., КРИВЕНКО С.А.

Показывается, что тестер максимального правдоподобия зависит только от диагностируемой радиоэлектронной системы.

Рассмотрим систему технической диагностики (СТД), представленную в общем виде на рис.1. Входные цифровые данные, характеризующие техническое состояние диагностируемого устройства, задаются, как правило, в двоичной форме, однако могут быть представлены и в другом алфавите из q^2 символов. Информация, поступающая со скоростью один символ каждые T_s секунд, содержит K диагностических признаков. Этот блок затем подается в цифровой имитатор в качестве одного из M возможных диагнозов, обозначаемых через $H_1, H_2, \dots, H_M$. Здесь $M = q^K$, а q — объем алфавита диагностических сообщений. Цифровой и аналоговый имитаторы вместе осуществляют отображение множества из M диагностических состояний $\{H_m\}$ на множество из M сигналов $\{x_m(t)\}$ конечной энергии и конечной длительности $T = K T_s$.

Диагностируемую радиоэлектронную систему (см. рис.1) можно рассматривать как одно случайное

отображение конечного множества имитируемых сигналов $\{x_m(t)\}$ в принимаемый случайный процесс $y(t)$. Прежде чем сигнал появится на выходе системы, на него накладывается целый ряд искажений.

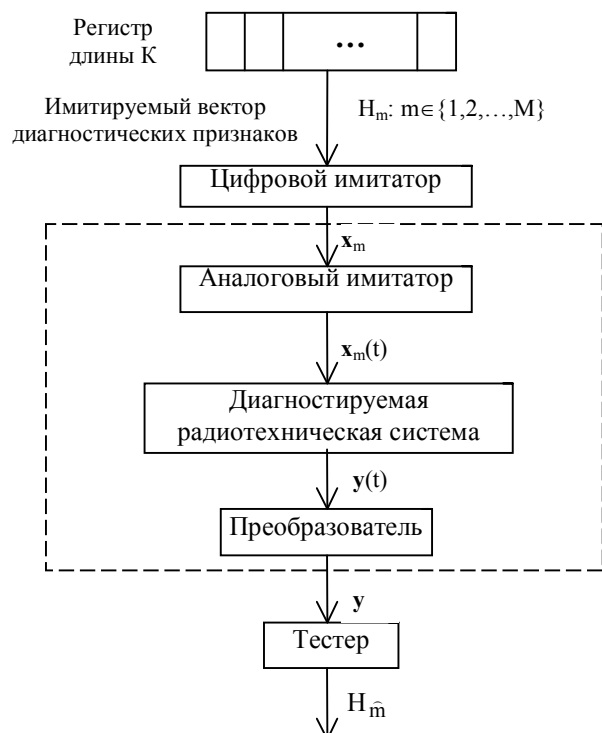


Рис.1. Система технической диагностики