

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 534.2+551.551

Дисперсия фазы узкополосных звуковых сигналов на приземных трассах

В.П. Мамышев, С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 31.05.2016 г.

Приводятся результаты анализа «мгновенной» фазы узкополосных звуковых сигналов при их распространении на коротких приземных трассах в условиях воздействия поля ветра. Применяется разделение фазы на детерминированную, квазидетерминированную («локальную») и случайную («турбулентную») составляющие. Рассмотрены гистограммы «турбулентной» составляющей фазы и результат аппроксимации этих гистограмм нормальным законом распределения вероятностей. Получена эмпирическая формула для связи дисперсий фазы на разных частотах с дисперсией скорости ветра на трассе распространения звука и проведено ее сравнение с теоретическими формулами.

Ключевые слова: акустика, ветер, приземный слой, турбулентность, фаза; acoustic, wind, surface layer, turbulence, phase.

Исследование фазы звуковых сигналов при их распространении в атмосфере носит как фундаментальный, так и прикладной характер. С точки зрения фундаментальных проблем переноса звукового излучения в случайных средах, несмотря на достаточно продолжительные исследования, остается нерешенным ряд задач, связанных, в частности, с искажением фазового фронта под воздействием неоднородностей полей ветра и температуры воздуха с масштабами от десятков до сотен метров. Прикладное значение исследований статистических характеристик фазы звуковых волн заключается в возможности их использования для диагностики характеристик ветрового и температурного полей на трассе распространения звука, в задачах пеленга неподвижных или движущихся источников звука и при решении других задач. Результаты оценок характеристик турбулентности по акустическим измерениям могли бы быть полезными, например, при исследовании воздействия турбулентности на перенос оптического излучения [1, 2].

Не проводя полного обзора публикаций по теоретическим и экспериментальным исследованиям статистических характеристик фазы звуковых сигналов на атмосферных трассах, укажем лишь несколько работ, которые можно использовать для сопоставления с результатами наших исследований. В частности, в работах [3, 4] рассматриваются теоретические оценки дисперсии фазы акустических сигналов в зависимости от дисперсии показателя преломления звуковых волн, длины трассы распространения и несущей частоты сигнала для случаев

плоской и сферической волн. В [4] также приводится сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными работы [5]. Отметим, что помимо изучения непосредственно фазы звуковых волн, в ряде работ [6–8] исследуются статистические характеристики времен прихода звуковых сигналов в точку приема, которые могут быть использованы в некоторых методиках для пеленга источников звука. При этом дисперсии фазы и времен прихода звуковых сигналов линейно связаны между собой [7].

Цель наших исследований, результаты которых приведены в статье, заключалась в общей оценке вариаций «мгновенной» фазы узкополосных звуковых сигналов на коротких приземных трассах и в проверке основных связей статистических характеристик фазы со статистическими характеристиками среды распространения (в первую очередь с дисперсией скорости ветра).

В наших предыдущих исследованиях [9, 10] было установлено, что при анализе фазы звуковых сигналов, прошедших трассы длиной 40–100 м, ее вариации следует разделить, по крайней мере, на три составляющие: детерминированную, квазидетерминированную и случайную. Величина первой составляющей определяется средним потоком ветра, скорость и направление которого не изменяются на протяжении измерений. Эта составляющая остается постоянной на интервале обработки. Вторая составляющая характеризуется достаточно медленными (и чаще всего значительными) изменениями. Ее присутствие можно связать с наличием крупномасштабных (квазидетерминированных) неоднородностей в поле ветра, сопоставимых с длиной трассы или меньших по размеру. И третья составляющая носит сугубо случайный характер и связана с турбулентными

* Владимир Петрович Мамышев (mvp78ioa@iao.ru);
Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

пульсациями компонентов вектора ветра. Основное внимание далее уделено анализу «турбулентной» составляющей фазы звуковых сигналов, в частности, ее связи с дисперсией динамической турбулентности.

Ниже обсуждаются результаты анализа экспериментальных данных, полученных в августе 2015 г. при распространении узкополосных непрерывных звуковых сигналов с частотами 500, 1500 и 2500 Гц по трассе длиной 74 м над ровной подстилающей поверхностью с травяным покрытием. В качестве источников звука использовались серийные громкоговорители типа 200ГРДП, размещенные на высоте 4 м. Эти громкоговорители имели диаграммы направленности шириной от 6 до 40° в зависимости от несущей частоты. Излучался или один сигнал на заданной частоте (одним источником), или пара сигналов на разных частотах (двумя источниками отдельно).

Приемниками звука служили серийные микрофоны типа МК221 (1/2"; использовалась сферическая тканевая ветрозащита). Полоса пропускания измерительного канала составляла 0,002–16,5 кГц с нелинейностью амплитудно-частотной характеристики в этой полосе не более $\pm 0,5$ дБ. Приемный блок позволял регистрировать сигналы в динамическом диапазоне около 60 дБ. Микрофоны располагались на линии, перпендикулярной к трассе распространения звука. Всего использовалось шесть микрофонов, размещенных парами на высотах 0,2

и 1,5 м над подстилающей поверхностью. Расстояние между смежными парами микрофонов составляло 1 и 5 м (6 м между крайними парами). Схема эксперимента показана на рис. 1. Оцифровка принимаемых сигналов производилась с частотой 50 кГц для каждого измерительного канала. В архивные файлы управляющего компьютера записывались выборки длительностью 10 мин. Суммарное время измерений для каждой несущей частоты составляло 70 мин.

Для метеорологического сопровождения экспериментов использовались две ультразвуковые метеостанции (УЗМ) «Метео-2» [11], размещенные на высоте 2,3 м над подстилающей поверхностью. Одна УЗМ находилась примерно на середине трассы звука, а вторая — вблизи приемной базы. Измерения метеорологических характеристик (температуры воздуха и компонентов вектора ветра) проводились с частотой 11 Гц.

Для обработки исходных экспериментальных данных использовалось специальное программное обеспечение, позволявшее проводить цифровую фильтрацию в заданной полосе частот, определять отгибающие и «мгновенные» фазы отфильтрованных сигналов, а также производить ряд других необходимых вычислений. Не вдаваясь в детали разработанного алгоритма определения «мгновенной» фазы, отметим лишь применение процедур «цифрового» гетеродинирования.

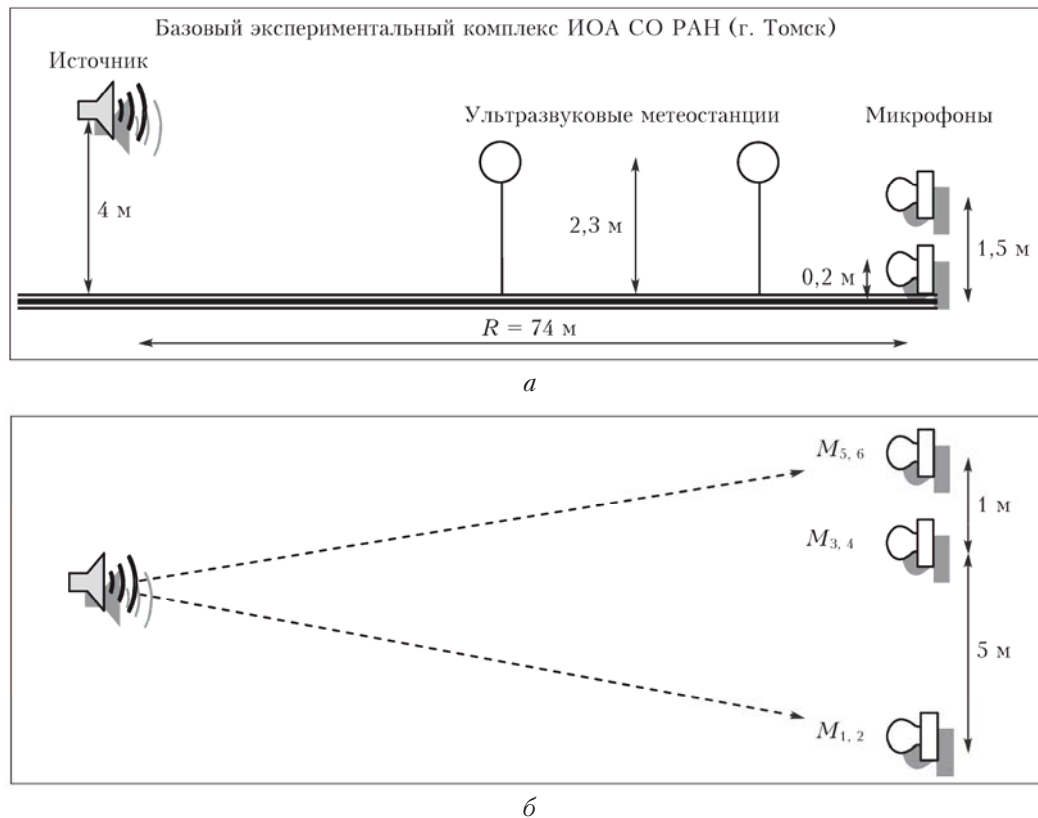


Рис. 1. Схема эксперимента: а — вид сбоку; б — вид сверху. Нечетные номера измерительных каналов M_i расположены в нижнем ряду (0,2 м), а четные — в верхнем (1,5 м)

Предполагалось, что после цифровой фильтрации (в полосе ± 50 Гц относительно несущей частоты f) регистрируемый в момент времени t сигнал (звуковое давление p , Па) может быть представлен в виде

$$p_i(t, f) = A_i(t) \sin[2\pi f t + \varphi_i(t, f)] + S_i(t), \quad (1)$$

где i – номер приемного канала; $A_i(t)$ – амплитуда звукового давления (огibaющая); $\varphi_i(t, f)$ – «мгновенная» фаза сигнала; $S_i(t)$ – помеха, которая формируется окружающей средой, включая эффекты воздействия ветра на приемные микрофоны, и шумом аппаратуры. Все входящие в правую часть функции времени являются случайными величинами. Амплитуда «полезных» сигналов $A_i(t)$ в заданной полосе была существенно больше помехи $S_i(t)$ (в среднем не менее чем на 6 дБ). Поэтому какие-либо специальные меры для «очистки» сигнала от помехи не применялись.

Анализ экспериментальных выборок $p_i(t, f)$ основывался на предположении, что «мгновенная» фаза $\varphi_i(t, f)$ (рад) может быть представлена в виде (далее зависимость фазы от частоты не указываем)

$$\varphi_i(t) = \varphi_{i,G} + \varphi_{i,M} + \varphi_{i,V}(t), \quad (2)$$

где $\varphi_{i,G}$ – детерминированный (постоянный) компонент фазы, связанный с «геометрией» эксперимента (определяется, в том числе, расстоянием между источником и приемником); $\varphi_{i,M}$ – детерминированный компонент фазы, связанный с влиянием среднего ветра (постоянного в период получения выборки); $\varphi_{i,V}(t)$ – вариативная (случайная) составляющая фазы. Примененный алгоритм обработки экспериментальных данных в итоге обеспечивал получение только вариативной составляющей $\varphi_{i,V}(t)$ фазы. В качестве типичных примеров на рис. 2 представлены графики $\varphi_{i,V}(t)$ для разных приемных каналов при разных несущих частотах на разных высотах размещения микрофонов. Отметим, что «начальная» точка вычисленной вариативной фазы может отличаться от нуля как из-за случайного характера сигнала, так и вследствие процедуры исключения из анализа начальных участков обработанных выборок (порядка 1 с), где проявляются переходные процессы при цифровой фильтрации и некоторых других математических преобразованиях сигналов.

В соответствии с рис. 2, проведение «обычного» статистического анализа непосредственно вариативной составляющей фазы φ_V (например, исследование корреляционных функций, вычисление моментов различного порядка) не представляется возможным, поскольку изменения φ_V носят явно нестационарный характер. По крайней мере, на интервалах обработки 10 мин. В этой связи сначала следует разделить φ_V на несколько составляющих и затем провести обработку каждой из них. Далее предполагалось, что фаза $\varphi_{i,V}(t)$ может быть разделена на две составляющие:

$$\varphi_{i,V}(t) = \varphi_{i,L}(t) + \varphi_{i,T}(t). \quad (3)$$

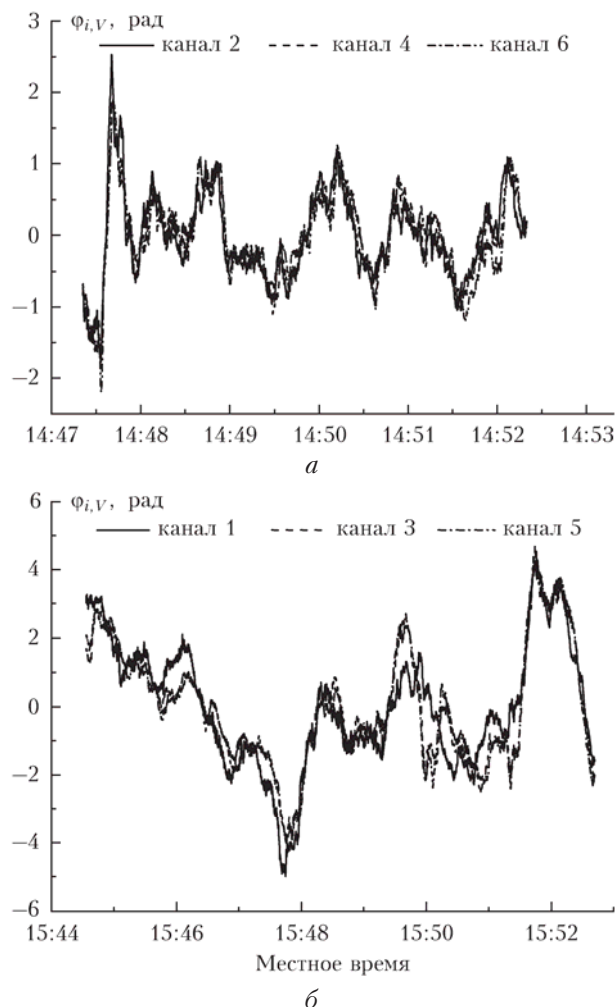


Рис. 2. Примеры вариативной составляющей фазы, полученной из обработки экспериментальных данных для каналов №№ 2, 4 и 6 с несущей частотой 500 Гц и высоты размещения микрофонов 1,5 м (а); для каналов №№ 1, 3 и 5 с несущей частотой 2500 Гц и высоты размещения микрофонов 0,2 м (б). Измерения проводились 20.08.2015 г.

Первая составляющая $\varphi_{i,L}$ связана с медленными («локальными») вариациями, обусловленными квазидетерминированными изменениями компонентов вектора ветра в период проведения измерений. Вторая («турбулентная») составляющая $\varphi_{i,T}$ определяется мелкомасштабными пульсациями ветра турбулентного характера.

«Локальная» составляющая фазы $\varphi_{i,L}(t)$ вычислялась путем сглаживания вариативной фазы $\varphi_{i,V}(t)$ скользящим средним с «временным окном» 20 с. Размер этого «окна» был выбран исходя из оценок, основанных на работах [9, 12]. «Турбулентная» составляющая $\varphi_{i,T}(t)$ определялась как разность между $\varphi_{i,V}(t)$ и $\varphi_{i,L}(t)$. В качестве примера на рис. 3 приведены графики, иллюстрирующие результат разделения вариативной фазы, представленной на рис. 2, б, на «локальную» и «турбулентную» составляющие.

В соответствии с рис. 3, а, изменения «локальной» фазы в канале № 1 несколько отличаются от практически синхронных изменений в каналах

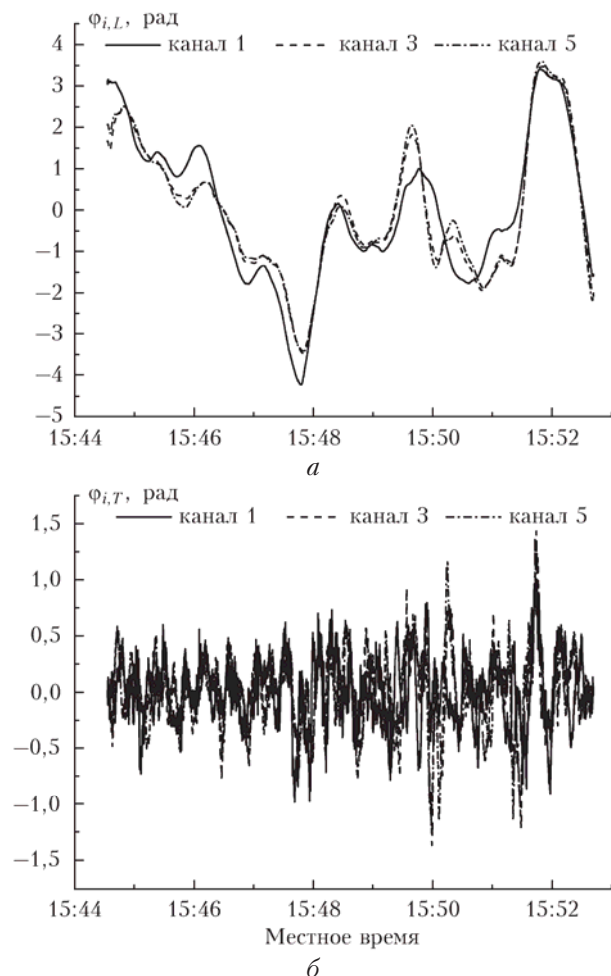


Рис. 3. «Локальная» (а) и «турбулентная» (б) составляющие вариативной фазы при распространении сигнала с несущей частотой 2500 Гц; высота размещения микрофонов 0,2 м. Измерения проводились 20.08.2015 г.

№№ 3 и 5, хотя общий ход $\varphi_{i,L}(t)$ в целом однотипен во всех каналах. Это объясняется, по-видимому, тем, что расстояние между микрофонами в каналах №№ 3 и 5 составляло всего 1 м, в то время как микрофон канала № 1 размещался в 5 м от ближайшего микрофона (канал № 3). Вариации «турбулентной» фазы, представленные на рис. 3, б, во всех каналах примерно одинаковы по величине.

Одной из задач при анализе «турбулентной» составляющей $\varphi_{i,T}$ была проверка соответствия эмпирических гистограмм $\varphi_{i,T}$ нормальному закону распределения. Этот закон обычно постулируется в теоретических работах по распространению звука в атмосфере как случайно-неоднородной движущейся среде. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что в целом эмпирические гистограммы достаточно близки к нормальному закону. В качестве примера на рис. 4 символами представлены гистограммы $\varphi_{i,T}$, полученные по измерениям 20.08.2015 с 15:31 до 15:41 (а) и 21.08.2015 с 13:44 до 13:54 местного времени (б) при одновременном излучении сигналов с частотами 500 Гц (сплошные символы) и 2500 Гц (открытые символы).

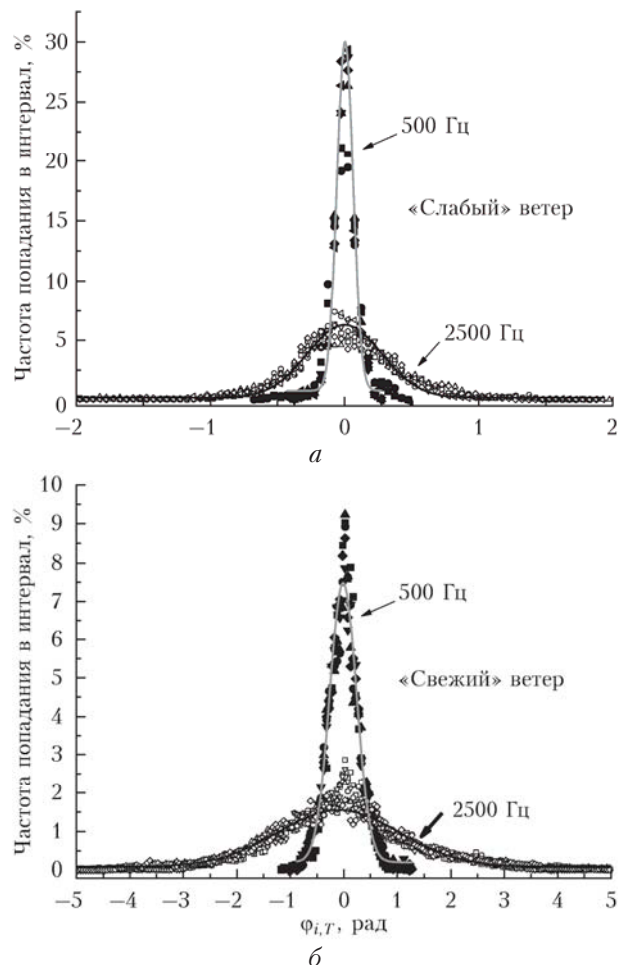


Рис. 4. Гистограммы (символы) распределения «турбулентной» фазы в каналах №№ 1–6 для несущих частот 500 и 2500 Гц в двух эпизодах: а – 20.08.2015 г., 15:31–15:41; б – 21.08.2015 г., 13:44–13:54. Шаг интервала при расчете гистограммы 0,05 рад. Сплошными линиями показаны аппроксимации гистограмм нормальным законом распределения в канале № 6

Шаг расчета гистограмм составлял 0,05 рад. Первый эпизод характеризуется слабым ветром (средняя скорость ветра $V_h \approx 1,4$ м/с, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{V_h} \approx 0,32$ м/с), а второй – более сильным ($V_h \approx 2,4$ м/с, $\sigma_{V_h} \approx 0,72$ м/с). На этих же графиках сплошными линиями показаны аппроксимации гистограмм нормальным законом распределения (для канала № 6; высота измерений 1,5 м). Отметим, что для несущей частоты 1500 Гц, которая также использовалась в наших экспериментах, гистограммы $\varphi_{i,T}$ занимают некоторое «промежуточное» положение между гистограммами для 500 и 2500 Гц.

Подчеркнем, что без разделения вариативной фазы на «локальную» и «турбулентную» составляющие невозможно получить корректные законы ее распределения вероятностей при относительно коротких интервалах времени обработки (10 мин). В этой связи отметим, что если при статистическом анализе огибающих звуковых сигналов не применять разделения их вариаций на «локальные» и «турбулентные»

составляющие, то распределение вероятностей огибающих может подчиняться различным законам в зависимости от несущих частот и текущих метеоусловий [13], а не только нормальному закону, как это постулирует теория.

Приведенные на рис. 4 примеры отражают очевидный факт увеличения дисперсии «турбулентной» фазы σ_T звуковых сигналов с увеличением дисперсии ветра на трассе распространения звука. При этом чем больше несущая частота сигнала, тем дисперсия фазы σ_T больше. Рассмотрим далее связь дисперсии «турбулентной» фазы с дисперсией скорости ветра, точнее, связь их среднеквадратических отклонений $\sigma_{\phi T}$ (фаза) и σ_{V_h} (ветер). Но сначала отметим, что влиянием неоднородностей температурного поля на флуктуации фазы мы пренебрегаем, поскольку в период проводившихся экспериментов вклад флуктуаций скорости ветра в дисперсию показателя преломления звуковых волн был как минимум на порядок больше, чем флуктуаций температуры воздуха.

На рис. 5 для частот 500, 1500 и 2500 Гц символами показаны значения $\sigma_{i, \phi T}$ в зависимости от σ_{V_h} (использовались измерения ветра на середине трассы). Каждому символу на графике соответствует оценка $\sigma_{i, \phi T}$ в канале с номером « i » по 10-минутным интервалам времени.

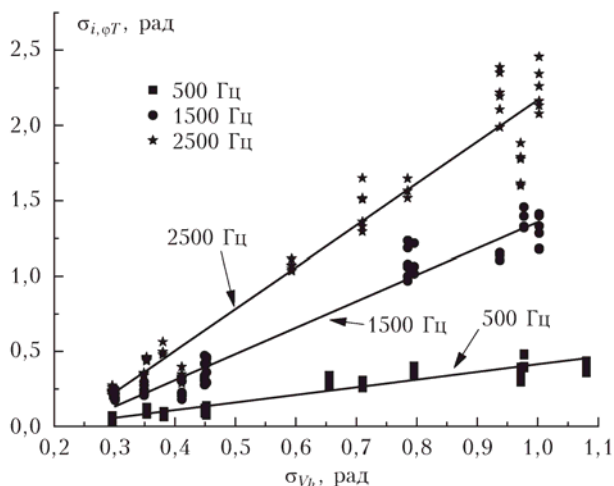


Рис. 5. Зависимости СКО «турбулентной» фазы $\sigma_{i, \phi T}$ (для совокупности каналов) от СКО скорости ветра σ_{V_h} для разных частот звуковых сигналов (символы) и результаты линейной аппроксимации этих зависимостей (линии)

Разброс значений функции $\sigma_{i, \phi T}(\sigma_{V_h})$ между измерительными каналами при одном и том же значении σ_{V_h} увеличивается как с увеличением σ_{V_h} , так и с увеличением частоты звукового сигнала. Причины разброса связаны, по-видимому, с особенностями структуры поля ветра в каждом конкретном эпизоде измерений и с недостатками в процедуре выделения «турбулентной» составляющей вариации фазы $\phi_{i, T}$. Тем не менее на приведенных графиках наблюдается в целом линейная зависимость $\sigma_{\phi T} \propto \sigma_{V_h}$. На рис. 5 линиями показаны аппроксимации этой зависимости функцией вида $\sigma_{\phi T}(f) \Leftrightarrow A(f) + B(f)\sigma_{V_h}$ для каждой из частот без разделения по каналам. Отметим, что аппроксимирующие линии стремятся

пересечь ось абсцисс (ось σ_{V_h}) при ненулевых значениях, т.е. дисперсия «турбулентной» фазы будет стремиться к нулю, даже если дисперсия ветра еще не равна нулю. Если нормировать коэффициенты $A(f)$ и $B(f)$ на несущие частоты f , то линейная аппроксимация приобретает вид

$$\sigma_{\phi T}(f) \Leftrightarrow f \cdot (M + C\sigma_{V_h}). \quad (4)$$

В соответствии с результатами аппроксимаций, приведенных на рис. 5, значения коэффициентов M и C в соотношении (4) можно приближенно положить постоянными и близкими к значениям $-0,0002$ и $0,001$ соответственно (был получен набор коэффициентов для разных частот: $M_{500} \approx -0,00019$, $C_{500} \approx 0,00102$, $M_{1500} \approx -0,00026$, $C_{1500} \approx 0,00117$, $M_{2500} \approx -0,00024$, $C_{2500} \approx 0,00111$).

Если рассматривать только диапазон значений $\sigma_{V_h} > 0,3$, то для функции $\sigma_{\phi T}(\sigma_{V_h})$ в проведенных экспериментах можно использовать приближенную формулу

$$\sigma_{\phi T}(f) \approx 10^{-3} \cdot f \cdot \sigma_{V_h}. \quad (5)$$

Соотношение (5) получено при аппроксимации эмпирической зависимости $\sigma_{\phi T}(\sigma_{V_h})$ для совокупности измерительных каналов. Подобные оценки были сделаны и для каждого канала отдельно. Не останавливаясь на подробностях, укажем, что при линейных аппроксимациях эмпирических зависимостей $\sigma_{\phi T}(\sigma_{V_h})$ для отдельных каналов коэффициенты C достаточно близки значению, примененному в (5): $C_{1-6, 500} = 0,00082-0,00114$, $C_{1-6, 1500} = 0,00112-0,00123$, $C_{1-6, 2500} = 0,00101-0,00117$. Отметим также, что значимых различий в коэффициентах линейных аппроксимаций для нижнего (0,2 м) и верхнего (1,5 м) уровней измерений не наблюдалось.

Полученная линейная зависимость СКО «турбулентной» составляющей вариативной фазы от несущей частоты сигнала и от СКО скорости ветра согласуется с теоретическими результатами. Покажем это. Воспользуемся формулой для дисперсии фазы, приведенной в [4]. При этом учтем, что влияние флуктуаций температуры воздуха на флуктуации фазы в нашем случае пренебрежимо мало. Переходя от дисперсий к среднеквадратическим отклонениям, запишем в итоге теоретическую формулу в виде

$$\sigma_{\phi} \approx \frac{\pi^{1/4} \sigma_{V_x} k \sqrt{R\Lambda}}{c\sqrt{2}} \sqrt{1 + F_2(D)}, \quad (6)$$

где c — скорость звука, м/с; $k = 2\pi f/c$ — волновое число, $1/\text{м}$; R — расстояние между источником звука и его приемником, м; Λ — характерный масштаб динамической турбулентности, м; $F_2(D)$ — некоторая безразмерная функция «волнового» параметра $D = 4R/(k\Lambda^2)$. Обратим внимание на то, что в формуле (6) фигурирует СКО σ_{V_x} для пульсаций скорости ветра вдоль трассы звука, а не СКО модуля скорости ветра σ_{V_h} , как в формуле (5). Вычисления показали, что в период проводившихся измерений величины σ_{V_x} и σ_{V_h} были достаточно близки и в формуле (6) можно сделать замену σ_{V_x} на σ_{V_h} .

Введем обозначение

$$G = \frac{\sqrt{2\pi}^{5/4} \sqrt{R\Lambda}}{c^2} \sqrt{1 + F_2(D)} = W \cdot K, \quad (7)$$

где $W = \sqrt{2\pi}^{5/4} c^{-2} \sqrt{R}$, $K = \sqrt{\Lambda} \sqrt{1 + F_2(D)}$. Тогда формула (6) примет вид

$$\sigma_\phi(f) \approx G \cdot f \cdot \sigma_{V_h}. \quad (8)$$

Сравнение (5) и (8) приводит к выводу, что по нашим экспериментальным данным $G \approx 10^{-3}$. Оценка величины W для условий проводившихся измерений ($R = 74$ м, $c = 342\text{--}346$ м/с) дает примерное значение $W \approx 4,3 \cdot 10^{-4}$ (использовалась «средняя» скорость звука $c = 344$ м/с). Характерный масштаб динамической турбулентности Λ может составлять от единиц до многих десятков (и даже сотен) метров в зависимости от текущих метеорологических условий (см., например, [14]). При этом единого подхода к его определению нет. Для оценок Λ воспользуемся достаточно распространенной методикой, заключающейся в определении величин пространственных сдвигов $r = \Lambda$ корреляционных функций $B(r)$, при которых значения $B(r)$ в $e \approx 2,718$ раз меньше, чем при нулевом сдвиге: $B(r = \Lambda) = e^{-1}B(0)$. Необходимо сделать два замечания относительно данной методики применительно к нашей задаче.

Во-первых, изначально мы имеем возможность получить корреляционные функции скорости ветра лишь во временной области $B_{V_h}(\tau)$, где τ — сдвиг во времени, с. При переходе к пространственным сдвигам r должно выполняться условие эргодичности процесса, и при оценке r следует использовать средние значения скорости ветра \bar{V}_h : $r = \tau \bar{V}_h$. В нашем случае вычисление \bar{V}_h проводилось по интервалу времени 10 мин.

Во-вторых, расчеты функций $B_{V_h}(r)$ и на их основе определение Λ были сделаны нами по «турбулентным» составляющим ветра $V_h'(t)$. Функции $V_h'(t)$ определялись путем вычитания из «мгновенных» значений $V_h(t)$ скользящего среднего \bar{V}_h , полученного с использованием «временного окна» 20 с (согласовано с процедурой выделения «турбулентных» фаз ϕ_T). Отметим, что простое вычитание из выборки $V_h(t)$ средней за 10 мин величины \bar{V}_h не обеспечивает удаления вариаций скорости ветра «локального» масштаба, которые приводят к «локальным» вариациям фазы. При этом корреляционная функция $B_{V_h}(r)$ будет существенно отличаться по форме от случая ее определения по выборкам $V_h'(t)$, что не позволяет адекватно оценивать Λ .

В итоге было установлено, что характерные масштабы Λ , оцененные по 10-минутным интервалам времени, изменялись в диапазоне значений от 3 до 20 м. Детальный анализ связей Λ со средним ветром или его моментами не проводился. Это составляет отдельный предмет исследований.

Полученные оценки Λ позволяют определить диапазон изменения «волнового» параметра $D = 4R/(k\Lambda^2)$ с использованием «крайних» значений f и Λ при $c = 344$ м/с: $0,01 < D < 4$. Функция $F_2(D)$, входящая в соотношение (7), имеет достаточно

сложный вид и здесь не приводится. Используя графические результаты ее расчетов в [4] и полученный диапазон значений D , вычисляем диапазон изменения $F_2(D)$: $1,3 < [1 + F_2(D)] < 2$. Знание Λ и F_2 обеспечивает оценку параметра K : $4 < K^2 < 40$. После подстановки в (7) значений W и K «теоретический» интервал изменения множителя G в формуле (8), соответствующий условиям проводившихся экспериментов, составляет $G \approx (0,85\text{--}2,72) \cdot 10^{-3}$ и включает в себя нашу экспериментальную оценку $G \approx 10^{-3}$.

Можно сделать вывод, что полученная на основе экспериментальных данных эмпирическая формула (5) удовлетворительно согласуется с теоретической формулой (6), несмотря на большое количество допущений, сделанных при ее выводе. Можно также предположить, что наблюдающиеся на рис. 5 отклонения экспериментальных данных от линейной аппроксимации связаны, в том числе, с влиянием изменяющегося от выборки к выборке размера характерного масштаба турбулентности Λ . По-видимому, в дальнейшем имеет смысл более подробно исследовать зависимость СКО «турбулентной» фазы от динамической турбулентности в форме $\sigma_{i,\phi_T} \propto K(\Lambda) \cdot \sigma_{V_h}$, т.е. с учетом влияния не только текущих значений σ_{V_h} , но и текущих значений масштаба Λ .

Еще раз подчеркнем, что полученные статистические оценки и эмпирические связи, соответствующие известным закономерностям, относятся к «турбулентной» (ϕ_T) составляющей вариативной фазы (ϕ_V). Если же проводить статистический анализ непосредственно вариативной фазы, то классических закономерностей, которые обсуждаются, например, в [3, 4], получить не удастся (по крайней мере, на 10-минутных интервалах измерений, использованных нами). Отметим, что если анализу подвергаются *разности фаз* в близко расположенных измерительных каналах, то решение проблемы выделения «турбулентных» составляющих этих разностей существенно упрощается, поскольку высокая синхронность изменения «локальных» вариаций фаз (ϕ_L) в разных каналах приводит к их компенсации при составлении разности. Однако это может оказаться не вполне обоснованным при большом пространственном разномсе точек измерения.

Подводя итог, сформулируем основные результаты работы. Во-первых, разработанный алгоритм определения «текущей» фазы узкополосных звуковых сигналов обеспечивает адекватные оценки ее вариативной составляющей после распространения звука по коротким приземным трассам. Во-вторых, изменения фазы сигнала во времени можно разделить на квазидетерминированную и случайную составляющие (для относительно коротких интервалов времени). В-третьих, дисперсия случайной составляющей фазы линейно связана с дисперсией скорости ветра, что соответствует теоретическим предсказаниям.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Программы ОФН РАН «Фундаментальные основы акустической диагностики искусственных и природных сред» (проект № П-12-1).

1. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Определе-ние скорости ветра в атмосфере по турбулентным искажениям видеоизображений лазерного пучка // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 723–729; *Afanas'ev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P.* Estimate of wind velocity in the atmosphere based on analysis of turbulent distortions of laser beam images registered by video camera // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 1. P. 88–94.
2. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Оценивание интегральной скорости ветра и турбулентности в атмосфере по искажениям видеоизображений естественно освещенных объектов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 285–293; *Afanas'ev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P.* Estimate of the integral images of naturally illuminated objects // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 422–430.
3. *Ostashev V.E., Mellert V., Wandelt R., Gerdes F.* Propagation of sound in a turbulent medium. I. Plane waves // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 102, iss. 5. P. 2561–2570.
4. *Ostashev V.E., Mellert V., Wandelt R., Gerdes F.* Propagation of sound in a turbulent medium. II. Spherical waves // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 102, iss. 5. P. 2571–2578.
5. *Daigle G.A., Embleton T.F., Piercy J.E.* Propagation of sound in the presence of gradients and turbulence near the ground // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1986. V. 79. P. 613–627.
6. *Karweit M., Blanc-Benon P., Juve D., Comte-Bellot G.* Simulation of the propagation of an acoustic wave through a turbulent velocity field: A study of phase variance // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1991. V. 89. P. 52–62.
7. *Norris D.E., Wilson D.K., Thomson D.W.* Correlations between acoustic travel-time fluctuations and turbulence in the atmospheric surface layer // *Acta Acust. Acust.* 2001. V. 87. P. 677–684.
8. *Перепелкин В.Г.* Теория влияния анизотропной турбулентности на флуктуации азимутов и углов скольжения акустических сигналов в нижней и средней атмосфере // Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 129–132.
9. *Мамышев В. П., Одинцов С. Л.* Влияние неоднородностей поля ветра на фазовые характеристики звуковых сигналов в приземном слое атмосферы на коротких трассах // Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 154–159.
10. *Мамышев В.П., Одинцов С.Л.* Распределение вероятностей фазы узкополосных звуковых сигналов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Международного симпозиума [Электронный ресурс – 1 CD-ROM]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016.
11. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7(109). С. 21–25.
12. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Экспериментальные оценки компонентов тензора анизотропии турбулентности в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 689–697; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Experimental estimates of turbulence anisotropy tensor components in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 34–42.
13. *Мамышев В.П., Одинцов С. Л., Астафуров В.Г., Пастухова С.М.* Статистика огибающих тональных звуковых сигналов в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 266–269.
14. *Гладких В.А., Одинцов С.Л.* Анализ структурных функций температуры и скорости ветра в приземном слое атмосферы // Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 139–143.

V.P. Mamyshev, S.L. Odintsov. **Dispersion of phase of narrow-band acoustic signals at near-surface paths.**

The “instantaneous” phase of narrow-band acoustic signals propagating along short near-surface paths under the effect of the wind field has been analyzed. The phase was divided into the deterministic, quasi-deterministic (“local”), and random (“turbulent”) components. Histograms of the turbulent phase component and the results of approximation of these histograms by the normal probability distribution law have been considered. An empirical equation, which relates the dispersion of phase at different frequencies with the dispersion of wind velocity at the sound propagation path, has been derived and compared with theoretical equations.