

В. А. КРАСИЛЬНИКОВ

О ФЛУКТУАЦИЯХ ФАЗЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

(Представлено академиком А. Н. Колмогоровым 19 XI 1952)

Летом и осенью 1951 г. в Хлебниково под Москвой был поставлен ряд опытов по распространению ультразвука в атмосфере. Нас интересовал вопрос о том, каков характер флуктуаций фазы и амплитуды* ультразвуковых волн на таких частотах (применялись частоты в диапазоне 20—60 кГц), когда длины волн ($\lambda \sim 0,5 \div 1$ см) лежат вблизи внутреннего масштаба турбулентности, имеющего в приземном слое воздуха порядок 1 см, и, следовательно, длина волны λ меньше всех более крупных неоднородностей коэффициента преломления, составляющих спектр пульсаций поля скоростей и поля температур. На применяемых частотах можно поэтому считать, что при теоретическом обсуждении результатов измерений с большим правом законно пользоваться представлениями геометрической акустики, чем для частот звукового диапазона.

Блок-схема установки для наблюдения и записи флуктуаций фазы и амплитуды ультразвуковых волн представлена на рис. 1.

Напряжение с генератора электрических колебаний поступало на излучатель ультразвука и одновременно на одно плечо регистрирующего фазометра. На другое плечо фазометра поступал сигнал с усилителя, соединенного с приемником ультразвука. В качестве регистрирующего фазометра применялся ламповый фазометр с гетеродинированием, показания которого не зависели от амплитуды входного сигнала. Точность измерений разности фаз фазометром составляла $2-3^\circ$ фазы, а диапазон изменения фазы $0-n\pi$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Гетеродином в установке служил стандарт-сигнал-генератор, напряжение с которого поступало одновременно на два плеча фазометра.

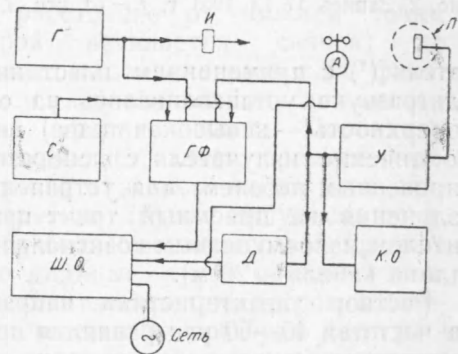


Рис. 1. Блок-схема установки. Г — генератор, И — излучатель, С — стандарт-сигнал, Г. Ф. — гетеродинный фазометр, Ш. О. — шлейфовый осциллограф, Д — детектор, П — приемник, А — анемометр, У — усилитель, К. О. — катодный осциллограф

* В настоящей заметке мы ограничиваемся описанием результатов измерений флуктуаций фазы, поскольку измерения флуктуации амплитуды сигнала носили предварительный характер.

RC-фильтры в фазометре выделяли разностную частоту, равную 500 гц. Настройка на эту частоту производилась по специальному индикатору (катодная трубка). Выход фазометра был соединен с шлейфом осциллографа, который записывал преобразованные в изменения среднего тока изменения разности фаз между излучателем и приемником ультразвука. Для записи изменений уровня сигнала напряжение с выхода усилителя детектировалось (детектирование линейное) и далее подавалось на второй шлейф осциллографа. Для записи средней скорости ветра применялся чашечный анемометр, снабженный контактами, установленный на одной высоте с излучателем и приемником.

В качестве излучателя-приемника ультразвуковых колебаний применялись специально изготовленные сегнетоэлектрические преобразо-

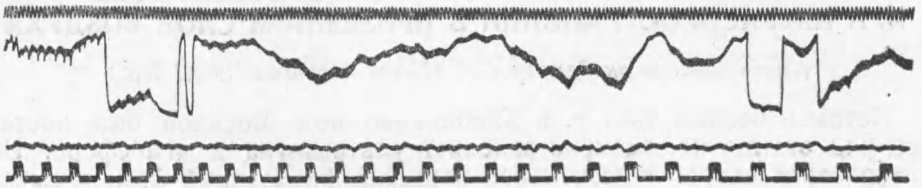


Рис. 2. Запись 17 IX 1951 г. $f = 51$ кгц, $L = 2,25$ м, $\bar{v} \approx 2,5$ м/с, параллельно ИП

ватели (1) с применением пластинки L среза. Излучатель и приемник ультразвука устанавливались на открытой площадке (подстилающая поверхность — невысокая трава) вне здания на мачтах высотой 2,2 м. Соединение излучателя с генератором производилось обычным экранированным кабелем; для устранения электрических наводок с тракта излучения на приемный тракт приемника пришлось соединить с усилителем малоемкостным коаксиальным кабелем с двойной экранировкой (длина кабеля ~ 20 м).

Раствор характеристики направленности излучателя (приемника) на частотах 40—50 кгц равнялся примерно $8-10^\circ$. Так как угол сноса диаграммы направленности при ветре, перпендикулярном к линии излучатель — приемник (ИП), равен $\alpha = \arctg \frac{\bar{v}}{c}$, где \bar{v} — средняя ско-

Таблица 1

Зависимость $\sigma_{\Delta, \varphi}$ от частоты ультразвука f ($\bar{v} = 3,2$ м/сек, $\Delta t = 0,04$ сек.)

Частота f в кгц	Расстояние L в м	Направление ветра	$\sigma_{\Delta, \varphi}$ в °	Время записи в сек.
30	2	⊥ ИП	20	8,7
41	2	·	30	9,2
51	2	·	38	10,0
21	2,25	ИП	12	7,0
31	2,25	·	20	5,4
41	2,25	·	25	5,2
15	2,25	·	35	7,4

рость ветра и c — скорость звука, то при максимальных скоростях ветра в 5 м/сек, которые были при записях, $\alpha \approx 50'$. При направлениях ветра, параллельных ИП или под некоторым углом к линии ИП, влияние сноса характеристики направленности, естественно, еще более

незначительно. Поэтому можно считать, что при правильно ориентированных излучателе и приемнике влиянием сноса характеристики направленности можно пренебречь. Излучатель и приемник устанавливались так, что осевые линии их диаграмм направленности совпадали; при этом уровень принимаемого сигнала был максимальным.

Главный источник ошибок при статистической обработке записей заключается в неточности измерений и записи средней скорости ветра. Оценка всех возможных ошибок приводит к тому, что средняя точность в результате статистической обработки за время не менее 5 сек. (100 точек, взятых через 0,04 сек.) составляет 2—3° фазы.

На рис. 2 приведена типичная осциллограмма. На ней верхняя кривая представляет запись переменного тока частоты 50 гц (марки времени). Следующая кривая представляет запись флуктуаций разности фаз между точкой нахождения излучателя и точкой расположения приемника.

Резкие скачки фазы сверху вниз (или снизу вверх) соответствуют переходу фазы через 0 или 360°, а расстояние от нижней точки

(от которой начинается скачок) до верхней равно на осциллограмме 360° фазы. Ниже записи разности фаз записана кривая флуктуаций уровня сигнала. Последняя запись представляет запись средней скорости ветра; эта запись имеет вид следующих друг за другом импульсов тока.

При обработке осциллограмм брались достаточно длинные куски пленки с возможно постоянным средним ветром. В зависимости от частоты ультразвука f , от расстояния между излучателем и приемником L , от средней скорости ветра \bar{v} и от промежутка времени Δt , за который снимаются показания с записи, подсчитывалось среднее квадратичное изменчивости разности фаз:

Таблица 2

Зависимость $\sigma_{\Delta t \varphi}$ от расстояния L
($f = 41$ кгц, $\bar{v} = 2,8$ м/сек, направление ветра \parallel ИП, $\Delta t = 0,04$ сек.)

Расстояние L в м	$\sigma_{\Delta t \varphi}$ в °	Время записи в сек.
0,7	14	7,7
1,5	16	6,8
2,2	23	5,2
3,0	27	9,1
3,7	33	7,4

Таблица 3

Зависимость $\sigma_{\Delta t \varphi}$ от средней скорости ветра \bar{v}
($L = 2,5$ м, $f = 41$ кгц, $\Delta t = 0,04$ сек.; направление ветра \perp ИП)

\bar{v} в м/сек	$\sigma_{\Delta t \varphi}$ в °	Время записи в сек.
1,1	12	4,5
3,2	31	6,9
4,4	44	8,2
5,0	45	6,1

$$\sigma_{\Delta t \varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_i - \varphi_{i+1})^2}{N}}$$

где N —число точек, взятых через интервалы времени Δt . Результаты статистической обработки записей флуктуаций разности фаз приведены в табл. 1, 2, 3 и 4.

Данные табл. 1 показывают, что при неизменных L , \bar{v} и Δt $\sigma_{\Delta t \varphi}$ растет приблизительно пропорционально частоте ультразвука f . Зависимость $\sigma_{\Delta t \varphi}$ от расстояния L характеризуется данными табл. 2, из которой следует, что $\sigma_{\Delta t \varphi}$ растет с расстоянием примерно как $L^{1/2}$.

В табл. 3 приведена зависимость $\sigma_{\Delta t \varphi}$ от средней скорости ветра \bar{v} ; из этой таблицы видно, что при неизменных f , L и Δt среднее квадратичное изменчивости разности фаз растет примерно пропорционально \bar{v} .

В табл. 4 приведена зависимость $\sigma\Delta_t\varphi$ от Δt ; данные этой таблицы показывают, что среднее квадратичное изменчивости растет с Δt как $(\Delta t)^\alpha$, где $4/6 < \alpha < 5/6$.

Из данных табл. 1, 2, 3 и 4 можно заключить, что зависимость $\sigma\Delta_t\varphi$ от f , L , \bar{v} и Δt имеет тот же характер, что и для звуковых частот (²⁻⁴). Более того, численное сравнение с прежними экспериментами на звуковых частотах и с экспериментами, проводимыми на звуковых частотах одновременно с описываемыми в настоящей заметке, показывает, что между абсолютными значениями $\sigma\Delta_t\varphi$ для различных частот, раз-

Таблица 4

Зависимость $\sigma\Delta_t\varphi$ от интервала времени Δt
($f=50$ кгц, $L=2$ м, $\bar{v}=3,2$ м/сек, направление ветра \perp ИП, время записи 10 сек.)

Δt в сек.	$\sigma\Delta_t\varphi$ в °	Число точек
0,04	38	251
0,08	58	125
0,12	75	82
0,16	90	47
0,24	115	41
0,32	125	31
0,40	144	25

личных расстояний, различной скорости ветра и, наконец, различных Δt имеется полное соответствие. Таким образом, можно считать установленным, что в области частот от 1 до 60 кгц, в которой мы проводили измерения, имеют место указанные выше зависимости $\sigma\Delta_t\varphi$ от f , L , \bar{v} и Δt . Отметим, что эти зависимости совпадают с выводами теории флуктуаций фазы звуковых волн при их распространении в турбулентной атмосфере, данной нами ранее (⁵).

Научно-исследовательский институт физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
19 XI 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. А. Красильников, Звуковые волны, М., 1951, стр. 253. ² В. А. Красильников, ДАН, 46, № 3 (1945). ³ В. А. Красильников, К. М. Иванов-Шиц, ДАН, 67, № 4 (1949). ⁴ В. А. Красильников, К. М. Иванов-Шиц, Вестн. МГУ, № 2 (1950). ⁵ В. А. Красильников, ДАН, 47, № 7 (1945).