

Г. В. АБРАМОВ

К ВОПРОСУ ОБ УМЕНЬШЕНИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ В ТОЧКАХ КВАЗИПЛОСКОГО ПОЛЯ

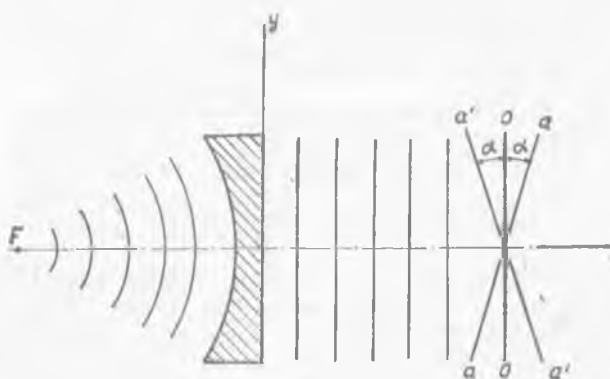
Квазиплоским принято называть поле, фазовые и амплитудные неоднородности которого меньше заданных. Под это определение, таким образом, подпадают как поля сферических волн на определенном расстоянии от источника, так и искусственно формируемые квазиплоские поля. Как показано в ряде работ автора [1, 2], одним из способов создания, например, квазиплоского акустического поля в диапазоне единиц мегагерц является использование рефракторных и рефлекторных акустических проекторных систем (АПС). Искусственно сформированное квазиплоское поле имеет другой характер изменения фазы поля при переходе от точки к точке, нежели квазиплоское поле, являющееся частью поля сферической волны. Однако для многих исследований важен не характер изменения фазы и интенсивности в точках поля, а величина локальных неоднородностей фазы и интенсивности. В силу многих причин величина неоднородностей искусственно сформированного квазиплоского поля может достигать значительной величины. Поскольку результаты экспериментальных исследований в таком поле существенно зависят от величины этих неоднородностей, измерение их представляется актуальной задачей. В данной статье рассмотрим только погрешности измерения фазы и пути уменьшения одной из них — систематической.

Как показано в [5], в тех случаях практики, когда погрешностью измерения фазы, обусловленной конечными размерами чувствительных элементов приемников (зондов) можно пренебречь, для построения фазовой картины поля в некотором его сечении может быть использован способ двух приемников [3] или двух зондов, как он еще называется в литературе. Существо способа заключается в следующем. Аппаратура соединяется так, как показано на рис. 1а, где 1 — приемники, 2 — усилители, 3 — фазометр. Пусть требуется измерить распределение фазы в плоскости 00 (рис. 1б). Тогда для некоторой аппликаты поля z чув-

ствительные элементы приемников 1 устанавливаются на требуемую глубину. Один из них в процессе измерения неподвижен и фаза принимаемого им колебания принимается за опорную. Он может быть помещен, например, в плоскости xz . Тогда при перемещении второго приемника по оси y фазометр 3 будет непрерывно измерять разность мгновенных значений фаз колебаний, принимаемых приемниками. Полагая условно фазу колебаний, принимаемых опорным приемником, равной нулю, мы, таким образом, измеренную разность фаз считаем фазой колебаний в той точке поля, где в данный момент помещается подвижный приемник.



а)



б)

Рис. 1.

При измерении распределения фазы методом двух приемников приходится учитывать инструментальную погрешность и погрешность установки взаимного положения чувствительных элементов приемников. Поясним это на примере измерения формы фазового фронта идеального плоского поля. Из рассмотрения методики измерения следует, что фазометр непрерывно производит сравнение мгновенных значений фаз сигналов неподвижного и подвижного приемников. Пусть бегущая ультразвуковая волна

распространяется вдоль оси x (рис. 1б), совпадающей с оптической осью прожекторной системы, а точечные приемники располагаются на координатной тележке, схематически изображенной в виде прямой aa , направление которой составляет с фазовым фронтом oo идеально плоской волны угол α . Тогда погрешность Δx установки взаимного положения чувствительных элементов приемников по оси x (погрешности установки приемников звука по другим осям в идеальном плоском поле не приводят к дополнительным погрешностям измерения фазы) приведет к различию в фазах принимаемых сигналов

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x, \quad (1)$$

где λ — длина акустической волны в исследуемом поле и среде.

Обозначим инструментальную погрешность измерения фазы через $\Delta\varphi_2$. Тогда суммарная абсолютная предельная погрешность измерения фазы может быть найдена как арифметическая сумма этих двух погрешностей, т. е.

$$\Delta\varphi = \pm (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2). \quad (2)$$

Если aa — прямая, то для любой точки волнового фронта выражение (1) может быть записано в виде

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} y \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где y — разность ординат подвижного и неподвижного приемников.

При этом (2) соответственно примет вид

$$\Delta\varphi = \pm \left(\frac{2\pi}{\lambda} y \operatorname{tg} \alpha + \Delta\varphi_2 \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что чем дальше расположен подвижный приемник от неподвижного, чем менее точно установлена параллельность координатной тележки и плоскости выходного зрачка прожекторной системы и чем короче длина волны, тем с большей погрешностью будут проведены измерения. Оценим величину этой погрешности. При этом будем полагать $\lambda = 1$ мм, $\alpha = 12,5'$ и $\Delta\varphi_2 = \pm 3^\circ$, а поперечный размер исследуемого поля $2y = 500$ мм. Отметим попутно, что пример не является надуманным. Указанные длина волны и размер поля взяты из экспериментальных исследований, проведенных автором. Что касается значений α и $\Delta\varphi_2$, то эти величины обеспечиваются при использовании теодолита типа ТН и фазометра Ф2-7. Результаты расчета по формуле (4) приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что при заданных размерах поля и рабочем диапазоне частот порядка единиц мегагерц обычная заимствованная из антенных измерений методика не позволяет получить необходимую точность измерений. Заметим, что многие при-

y (мм)	0	50	100	150	200	250
$\Delta\varphi$ (град)	± 3	± 57	± 111	± 165	± 219	± 273

менения квазиплоского акустического (ультразвукового) поля предполагают, что величина фазовых неоднородностей не превышает долей π и только в крайнем случае и только для получения средних значений при решении некоторых дифракционных задач можно принять $\Delta\varphi_{\text{доп}} = \pm\pi$. Из сказанного ясно, насколько величина $\Delta\varphi$ в рассмотренном случае превышает допустимую. Добиться уменьшения угла α в принципе, вероятно, возможно, но весьма сложно с конструктивно-технологической точки зрения, а потому этот прямой и очевидный путь в данном случае не является лучшим. Отметим, кстати, что выпускаемые в настоящее время отечественной промышленностью фазометры (в том числе и Ф2-7, примененный в наших исследованиях) дают однозначные отсчеты фазы лишь в пределах $\pm 180^\circ$.

Из рассмотренного примера следует, что без принятия специальных мер обычная методика измерения фазового распределения в квазиплоском ультразвуковом поле при $\lambda \leq 1$ мм неприемлема из-за недопустимо больших погрешностей.

Рассмотрим условия, при которых можно пользоваться методом двух приемников звука, для исследования фазового распределения в случае квазиплоского поля.

Разность фаз сигналов, принимаемых неподвижным и подвижным приемниками в квазиплоском поле, в общем случае можно рассматривать состоящей из трех составляющих: $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ и $\Delta\varphi_3$. Физический смысл составляющих $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ тот же, что и для идеального плоского поля в рассмотренном выше примере, а $\Delta\varphi_3$ — фазовая неоднородность квазиплоского поля для данной точки, т. е. точки поля, в которой помещается чувствительный элемент подвижного приемника. Фазовая неоднородность является следствием многих причин и, как показывают теоретические и экспериментальные исследования автора и его коллег, распределена она по периферии апертуры АПС по случайному закону. На основании сказанного выражение для разности фаз сигналов подвижного и неподвижного приемников в точках прямой aa квазиплоского поля можно записать в виде

$$\Delta\varphi = \pm (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3) = \pm \left(\frac{2\pi}{\lambda} y \operatorname{tg} \alpha + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3 \right). \quad (5)$$

Если в рассмотренном выше примере для идеального плоского поля измеренная разность фаз была в то же время и погрешностью измерений, то для квазиплоского поля погрешность измерения равна сумме $\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$, ибо $\Delta\varphi_3$ есть параметр, прису-

щий самому полю и существующей независимо от метода измерений.

Анализ выражения (5) позволяет сделать вывод о том, что систематическая погрешность измерений определяется главным образом величиной $\Delta\varphi_1$, и имеет вполне определенную зависимость от y при данном значении угла α . Так как в общем случае величина угла α нам неизвестна, то для исключения систематической погрешности может быть применен прием компенсации погрешности по знаку [4]. Этот прием сводится к тому, что путем специальных изменений условий эксперимента получают 2 отсчета, в которые систематическая погрешность или измеряемая величина входят с разными знаками. Полусумма (или полуразность) этих отсчетов свободна от влияния систематической погрешности. В соответствии с отмеченным для рассматриваемого случая может быть предложена следующая методика измерений. Весь интервал от $-y_{\text{макс}}$ до $+y_{\text{макс}}$ разбивается на несколько экспериментально определяемых меньших интервалов $-y'_{\text{макс}} \div +y'_{\text{макс}}$ таким образом, чтобы измеряемая величина $\Delta\varphi$ не превосходила 180° при помещении неподвижного приемника в середине выбранного интервала, а подвижного — в крайние точки интервала. Изменяя ординату y подвижного приемника от 0 до $\pm y'_{\text{макс}}$, фиксируем измеренные значения $\Delta\varphi$.

Для любой пары сопряженных точек частного интервала ординат (т. е. для $-y_1$ и $+y_1$; $-y_2$ и $+y_2$ и т. д.), можно записать

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi' &= \Delta\varphi'_1 + \Delta\varphi'_2 + \Delta\varphi'_3 \\ \Delta\varphi'' &= \Delta\varphi''_1 + \Delta\varphi''_2 + \Delta\varphi''_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Откуда

$$\frac{\Delta\varphi' + \Delta\varphi''}{2} = \frac{\Delta\varphi'_1 + \Delta\varphi''_1 + \Delta\varphi'_2 + \Delta\varphi''_2 + \Delta\varphi'_3 + \Delta\varphi''_3}{2} \quad (7)$$

Полагая на основе изложенного выше $\Delta\varphi'_1 = -\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi'_2 = \Delta\varphi''_2 = \Delta\varphi_2$ из (7) получаем

$$\frac{\Delta\varphi' + \Delta\varphi''}{2} = \overline{\Delta\varphi} = \Delta\varphi_2 + \overline{\Delta\varphi_3}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что для любой точки половины частного интервала в результате измерения получаем некоторое среднее значение фазовой неоднородности $\Delta\varphi_3$ с погрешностью $\Delta\varphi_2$. Сопряженным точкам другой половины частного интервала приписываем те же значения $\Delta\varphi$. Это конечно, несколько идеализированный случай, т. к. кроме $\Delta\varphi_2$ на точность измерения окажут влияние и такие причины, как, например, неточность изготовления направляющих координатной тележки, погрешности установки значений $-y_n$ и $+y_n$ и некоторые другие случайные факторы. Кроме того, еще одним недостатком предложенной методики

является, пожалуй, то обстоятельство, что независимо от реального распределения фазовой неоднородности в пределах частного интервала мы путем измерений искусственно придаем этому распределению симметричный характер. Правда выше отмечалось, что закон изменения неоднородности для экспериментальных исследований в квазиплоском поле, как правило, не имеет никакого значения. Важны абсолютные величины неоднородностей. Тем не менее хотелось бы, особенно при разработке и исследовании самих АПС, иметь более точную методику. Такой методикой, лишенной условностей описанной, представляется следующая. Изменение условий эксперимента должно состоять в изменении знака угла α . Неподвижный приемник помещается в крайнюю точку частного интервала и при данном значении угла α для каждого частного интервала снимается зависимость $\Delta\varphi$ от y . Затем угол α изменяется таким образом, чтобы знак его стал противоположным, а величина (и это очень принципиально) осталось той же, что и в первых измерениях. Далее измерения $\Delta\varphi$ повторяются уже при новом значении угла α . Формулы (5), (6), (7) и (8) остаются справедливыми и в этом случае. Только под $\Delta\varphi'$ и $\Delta\varphi''$ следует понимать разность фаз подвижного и неподвижного приемников, измеренную для одной точки прямой aa при разных значениях угла α .

И, наконец, если в распоряжении исследователя имеется прибор, измеряющий фазу в значительно более широком интервале, чем $\pm\pi$, то методика упрощается за счет исключения частных интервалов. Неподвижный приемник в этом случае помещается на край интересующего разреза поля, а подвижный приемник перемещается по линии aa , а затем по линии $a'a'$. Измеренные значения $\Delta\varphi'$ и $\Delta\varphi''$ для каждой точки этих прямых служат исходными для определения фазовой неоднородности по формуле

$$\Delta\varphi_3 = \frac{\Delta\varphi' + \Delta\varphi''}{2} \pm \Delta\varphi_2. \quad (9)$$

Формулой (9) пользуемся также и в предыдущем случае, когда фазометром служит прибор с однозначными отсчетами разности фаз в пределах $\pm\pi$. Проведенное нами детальное теоретическое и экспериментальное исследование вопроса о погрешности измерения фазы методом двух приемников [5] позволяет сделать вывод о том, что, если при проектировании экспериментальной установки с АПС исходить из интересов измерения фазы квазиплоского поля (а эти измерения нужно делать периодически), а результаты измерений подвергать статистической обработке с целью уменьшения влияния случайных факторов на точность измерения, то погрешность измерения будет незначительно превосходить величину инструментальной погрешности измерения фазы $\Delta\varphi_2$. Допустим, однако, что из-за неучтенных при выводе выражения (9) факторов погрешность измерения фазовой неод-

породности $\Delta\varphi_3$ превысит инструментальную погрешность 5 раз. Имея в виду, что для фазометра Ф2-7 $\Delta\varphi_2 = 2^\circ \div$ погрешность измерения фазы в этом случае составит 10. Поскольку при $\lambda = 1$ мм значения $\Delta\varphi_3$, которые следует ожидать на выходе рефракторной АПС, например, составят, как по ряду наших работ, величину порядка $150^\circ \div 180^\circ$, то указанную величину погрешности даже в этом случае (т. е. в случае измерения по сравнению с $\Delta\varphi_2$ в 5 раз) следует признать вполне допустимой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Г. В., Назарова Л. А. «Расчет функций распределения интенсивности и фазы ультразвукового поля в раскрыве плоско-вогнутых эллиптических линз и рефлекторов при облучении изотропным излучателем». Труды КуАИ, «Исследования по акустике и радиоэлектронике», вып. 44, Куйбышев, 1970.
2. Абрамов Г. В., Прокудин В. В. «Оценка амплитудных и фазовых неоднородностей поля в ближней зоне синфазно возбуждаемой апертуры». Труды КуАИ «Исследования по акустике и радиоэлектронике» вып. 44, Куйбышев, 1970.
3. Фрадин А. З., Рыжков Е. В. «Измерение параметров антенно-фидерных устройств». Связьиздат, М., 1962.
4. Карандеев К. Б. «Методы электрических измерений». Госэнергоиздат, М.—Л., 1952.
5. Абрамов Г. В., Назарова Л. А., Кудряшова М. Н. «Методика измерения локальных параметров квазиплоского ультразвукового поля». Научные труды вузов Поволжья. «Автоматические измерительные и регулирующие устройства». вып. V, Куйбышев, 1970.