

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДВУХЛУЧЕВОМ КОНТРОЛЕ: ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Многочувствительные системы ультразвукового (УЗ) контроля основаны на пространственно-распределённом приеме звуковых импульсов [1, 2]. Результирующий сигнал в приемном тракте системы является интерференцией сигналов, дошедших до приёмника различными путями в течение различного времени [3]. Для определения временного положения сигналов друг относительно друга может использоваться корреляционный прием, являющийся своего рода их фильтрацией во времени.

При двухлучевом контроле, как частном случае многочувствительного контроля, во взаимной корреляционной функции (ВКФ) сдвоенного и эталонного сигналов проявляются два пика, разность во временном положении которых соответствует задержке сигналов друг относительно друга (рис. 1, в).

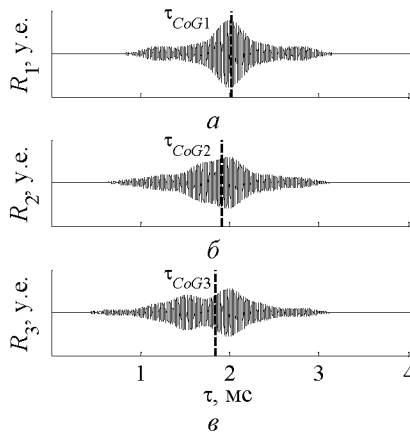


Рис. 1. Изменение формы ВКФ сдвоенного сигнала в приёмнике при росте относительной задержки между сигналами

Определение относительной задержки сигналов по положению пиков ВКФ является высокоточным методом, но затрачива-

ет дополнительные вычислительные ресурсы, т.к. требует вычисления производной огибающей ВКФ и оценки радиуса кривизны пиков [4]. К тому же такой подход не применим при малых относительных задержках, когда пики становятся неразличимы (рис. 1, б) и, соответственно, имеет нижнюю границу разрешения относительного положения импульсов.

На рис. 2 сплошной линией показано различие измеренной относительной задержки $\Delta T_{D_{\text{визм}}}$ по пикам ВКФ от заданной (ожидаемой) задержки $\Delta T_{D_{\text{ожид}}}$ на основе модельных расчётов, где в качестве излучаемого сигнала использован импульс длительностью 1 мс, заполненный несущей частотой 40 кГц, с фазовой модуляцией согласно последовательности Баркера 5 порядка. В этом случае разрешение относительного положения импульсов по временному расстоянию между пиками ВКФ составляет порядка 0,25 мс. Это соответствует 10-и периодам сигнала.

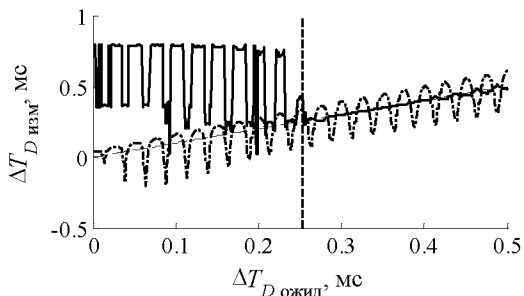


Рис. 2. Измеренная относительная задержка по положению пиков ВКФ (сплошная) и по средневзвешенному положению ВКФ (штрихпунктирная) в зависимости от заданной задержки при моделировании; вертикальной линией обозначен нижний предел возможности определения относительной задержки по пикам ВКФ

Измерение малых относительных задержек между сигналами в приёмнике (рис. 1, б) возможно по анализу асимметрии ВКФ [1], т.е. по её средневзвешенному положению (обозначено вертикальным пунктиром на рис. 1)

$$\tau_{CoG} = \frac{\int \tau R(\tau) d\tau}{\int R(\tau) d\tau}.$$

При этом симметричной ВКФ считается при нулевом значении задержки (рис. 1, *a*). Такой подход не ограничивает её измеряемую величину, т.е. не имеет нижней границы разрешения относительного положения импульсов. Разрешение определяется только частотой дискретизации сигналов.

На рис. 2 штрих-пунктирной линией показано различие измеренной задержки $\Delta T_{D \text{ изм}}$ по средневзвешенному положению ВКФ от заданной (ожидаемой) задержки $\Delta T_{D \text{ ожид}}$. Зависимость $\Delta T_D(\tau_{CoG})$ изменяется по линейному закону с наложением значительных квазирегулярных колебаний [1], частота которых соответствует несущей частоте ультразвука. При реальных экспериментальных измерениях колебания сглаживаются при длительном усреднении в связи с фазовыми флуктуациями сигналов.

Таким образом, корреляционный анализ на основе оценки асимметрии ВКФ повышает временное разрешение измерений при двухлучевом контроле неоднородной среды.

Литература

1. *Бычкова И.Ю.* Цифровая фазовая модуляция и корреляционная обработка ультразвуковых сигналов для импульсных измерений в неоднородной среде / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Приборы и техника эксперимента, 2018. – № 3. – С. 114–119.

2. *Бычкова И.Ю.* Импульсный ультразвуковой контроль стратификации воздуха над нагретой поверхностью / И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета, 2016. – № 1. – С. 39–46.

3. *Костюков А.С.* Изменчивость случайной погрешности ультразвуковых импульсных и доплеровских измерений в неоднородной среде / А.С. Костюков, М.В. Никандров, Л.А. Славутский // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 9. – С. 700–705.

4. *Креницкий Г.В.* Методы снижения влияния многолучевости на качество спутниковой навигации для обеспечения точного захода на посадку / Г.В. Креницкий, М.Д. Леонова, Е.Н. Юрасова // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 222. – С. 98–102.