

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ СКОРОСТИ

Д.В. Горенков, Т.В. Патрушева, Е.М. Патрушев

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В работе рассмотрен принцип ультразвукового измерения скорости, основанный на доплеровском методе измерения разности частот излучённого и отражённого сигналов. Исследованы возможности применения хаотической динамической системы, в частности осциллятора Дуффинга, в ультразвуковом измерителе скорости.

Ключевые слова: эффект Доплера, динамическая система, детерминированный хаос, фазовая диаграмма, отношение сигнал/помеха, осциллятор Дуффинга.

Ультразвуковые измерители скорости и расхода широко используются во многих областях промышленности и энергетики. Это обусловлено отсутствием подвижных частей в конструктивном исполнении, широким диапазоном измерения скорости и расхода, высокой точностью, отсутствием воздействия на поток. Однако перечисленные достоинства проявляются лишь в условиях, близких к идеальным. В остальных случаях применение таких приборов оказывается неэффективным из-за слабого и неустойчивого полезного сигнала в датчике, сильных помех или снижения отношения сигнал/помеха.

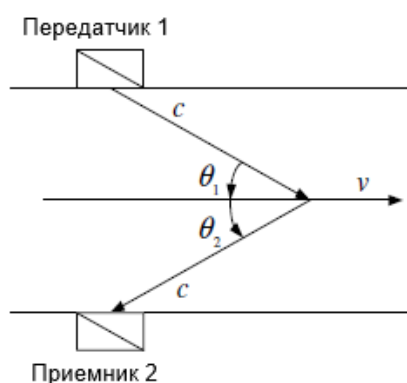


Рисунок 1 – Доплеровский метод измерения скорости с помощью ультразвука

Работа ультразвуковых измерителей скорости и расхода основана на излучении ультразвуковых колебаний в движущуюся среду, их приёме и дальнейшей обработке после прохождения через эту среду.

Рассмотрим доплеровский метод измерения скорости с помощью ультразвуковых колебаний. Он основывается на принципе ультразвукового доплеровского измерения сдвига частоты. В процессе непрерывного считывания фиксированной частоты ультразвуковых колебаний при столкновении ультразвука с частицами в движущейся среде, частоты сгенерированной и отражённой волн будут отличаться на величину, прямо пропорциональную скорости объекта. В процессе измерения определяется величина этой разности, как показано на рисунке 1.

Пусть передатчик 1 генерирует ультразвуковое колебание с фиксированной частотой f_1 , а частота отражённой волны выражается как f . Предположим, что скорость среды и частиц в ней равна v . Если скорость волны в неподвижной среде равна v_1 , частота отражённой волны равна f и определяется выражением:

$$f_1 = \frac{v_1 + v \cos \theta_1}{v_1 - v \cos \theta_2},$$

где θ_1, θ_2 – углы между направлением излучения передатчика, направлением отражения и направлением скорости соответственно.

Если $v_1 \gg v$ и $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, то

$$f = f_1 \left(1 + \frac{2v \cos \theta}{v_1} \right).$$

Исходя из этого, значение разницы частот излучённой и отражённой волн:

$$\Delta f = \frac{2\nu \cos \theta}{\nu_1} f_1.$$

В неидеальных условиях получаемый сигнал может быть слаб, снабжён нестационарными помехами или иметь паразитную амплитудную модуляцию. Обработка такого сигнала требует большого числа достаточно сложных электронных блоков. Альтернативным путём решения проблемы является использование генератора детерминированных хаотических колебаний в качестве блока первичной обработки принятого сигнала.

Известно, что при соблюдении определённых условий, использование нелинейных преобразований позволяет добиться большой помехоустойчивости [1,2]. Генератор хаоса нечувствителен к воздействию шумов и помех, в то время как воздействие периодических сигналов на генератор хаоса качественно изменяет динамику движения в нём. Последние исследования подтверждают способность генераторов хаоса к обнаружению сигналов на фоне нестационарных помех [3].

Рассмотрим хаотический осциллятор Дуффинга как систему обнаружения слабых сигналов. Хаотическая система имеет амплитудную и частотную характеристику чувствительности при переходе системы от хаотического движения к периодическому.

Общий вид дифференциального уравнения системы Дуффинга:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = r \cos \omega t,$$

где k – коэффициент затухания; x^3 – нелинейная упругость.

Установим значения $k = 0.5$, $\omega = 1$ и $r = 0.825$.

На рисунке 2 представлены фазовые диаграммы системы при различных значениях параметра r . Поскольку амплитуда внешнего воздействия изменяется от меньшей к большей, состояние системы варьируется от кругового движения к бифуркационному, затем к хаотическому движению, к критической точке (хаос, но на грани перехода к периодическому движению), и, наконец, к периодическому движению. Когда система находится близко к критическому состоянию, небольшое изменение параметра r может привести к качественному изменению динамики хаотической системы.

Обнаружение слабого сигнала осуществляется через переход состояния системы от хаотического к периодическому в управляемом осцилляторе Дуффинга:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = r_d \cos \omega t + \Delta r \cos \omega_c t,$$

где $\Delta r \cos \omega_c t$ – слабый сигнал, подлежащий обнаружению; $r_d \cos \omega t$ – эталонная движущая сила; r_0 – бифуркационное значение системы.

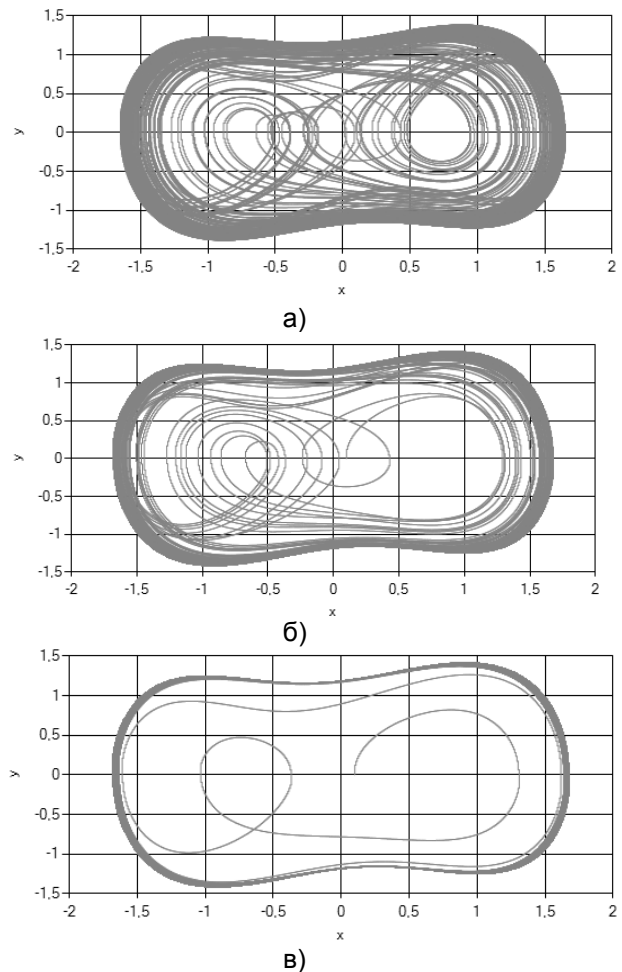


Рисунок 2 – Фазовые диаграммы осциллятора Дуффинга а) при хаотическом движении, $r = 0.825$; б) при нахождении системы в критической точке, $r = 0.8278$; в) при периодическом движении, $r = 0.8279$

Установлены значения $\Delta r \ll r_d$, $r_d + \Delta r \ll r_0$, $r_d \ll r_0$. Если частота определённого сигнала $\Delta r \cos \omega_c t$ совпадает с частотой внешнего воздействия $r_d \cos \omega t$, это приведет к следствию $r_d + \Delta r \ll r_0$. При фазовом переходе системы от хаотического движения ($r = 0.8278$) к периодическому ($r = 0.8279$) некоторый слабый сигнал $\Delta r \cos \omega_c t$

(в данном случае $\Delta r = 10^{-4}$) может быть обнаружен хаотическим осциллятором [5,6].

Анализируя выходной частотный спектр системы, изображённый на рисунке 3, можно увидеть, что при периодическом движении он включает в себя только основную частоту колебаний и нечётные гармоники, в то время как при хаотическом движении в спектре находится множество различных составляющих, подавляющее большинство которых имеет частоту ниже основной [2].

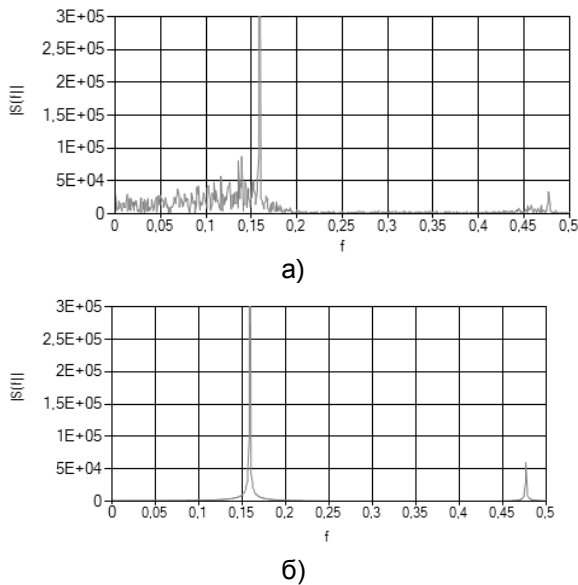


Рисунок 3 – Спектр частот осциллятора Дуффинга при хаотическом движении (а) и при периодическом движении (б)

Немаловажное значение при анализе хаотических систем имеет такой параметр, как отношение сигнал/помеха (SNR), определяющийся как отношение между мощностью полезного сигнала и мощностью шума:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2.$$

В [5] приведено исследование данного параметра, однако не указано информации об исследуемой полосе частот.

Если известен шаг вычисления при расчёте решения дифференциального уравнения ΔT , то верхнюю частоту можно найти, используя теорему Котельникова:

$$f = \frac{1}{2\Delta T}.$$

Осцилляторы Дуффинга используются для обнаружения слабых сигналов неизвестной частоты. Слабый сигнал необходимо определять на основании фазовой диаграммы хаотической системы. Ограничение динамического диапазона также является существенной проблемой. Хаотические осцилляторы могут обнаружить слабый сигнал, но в некоторых условиях никак не реагируют на сильный сигнал.

Такую систему можно считать эффективной, но она имеет множество ограничений: сигнал, подлежащий обнаружению, должен быть периодическим и разность между частотами подлежащего обнаружению сигнала и эталонной частоты ограничена в достаточно узком диапазоне, вне которого сигнал не может быть обнаружен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuqing T Design of System for Ultrasonic Distance Measurement Instrument Based on Chaos Theory / T. Fuqing, Z. Sheng, Y. Peng // Congress on Image and Signal Processing, 2008.
2. Jalilvand A The Application of Duffing Oscillator in Weak signal detection/ A. Jalilvand, H. Fotoohabadi // ECTI Transactions on Electrical Eng., February 2011.
3. Патрушева, Т.В. Разработка обнаружителя периодических сигналов на основе генератора хаоса для приборов контроля, работающих в условиях нестационарных помех/ Т.В. Патрушева, Е.М. Патрушев // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2017. – № 2. – с. 71-76
4. Патрушева, Т.В. Детектор состояния в обнаружителе слабых периодических сигналов на основе генератора хаоса / Т.В. Патрушева, Е.М. Патрушев, И.С. Наздрюхин // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2012. – № 2. – с. 11-13
5. Chen H.Y. Chaos weak signal detecting algorithm and its application the ultrasonic Doppler bloodstream speed measuring/ H.Y. Chen, Z.Q. Zhang, L.G. Chang, J. Li // 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2005
6. Wang, G The Application of Chaotic Oscillators to Weak Signal Detection / G.Y. Wang, D.J. Chen, X. Chen // Transaction on Industrial Electronics, Apr, 1999, pp. 440-444.

Горенков Дмитрий Вячеславович – магистрант АлтГТУ, e-mail: gorenkov_dmitry@inbox.ru

Патрушева Татьяна Васильевна – старший преподаватель, тел. (3852)-290913, e-mail: attractor@list.ru;

Патрушев Егор Михайлович – к.т.н, доцент, тел. (3852)-290913, e-mail: attractor13@gmail.com.