

Л и т е р а т у р а

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стемповский В. Г., Шишкин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 210—215.
2. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Ипатов В. В., Миллер Е. Ю. Аппаратные средства мониторинга параметров атмосферы в обсерваториях РСДБ комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 33. С. 52—57.
3. Юрчук Э. Ф., Арсаев И. Е. Обеспечение единства измерений в микроволновой радиометрии // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 51—56.

4. Быков В. Ю., Ильин Г. Н. Регулируемые генераторы шума К-диапазона длин волн // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 6. С. 66.
5. Арсаев И. Е., Юрчук Э. Ф., Саргсян М. В. Некоторые вопросы калибровки НШИ500 — широкоапертурной меры единицы шумовой температуры на частотах 20,7 и 31,4 ГГц // Тезисы докладов IX Всерос. научн.-техн. конф., 17—19 июня 2014 г., Менделеево, С. 167—171.
6. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966.
7. ГОСТ 8.736—2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Дата принятия: 29.06.2016.

681.518.3.621.371

Корреляционный метод обработки сигналов сверхвысокочастотных доплеровских датчиков

Д. В. ХАБЛОВ

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, e-mail: dkhablov@mail.ru

Предложен метод обработки сигналов сверхвысокочастотных датчиков. Применение метода позволяет существенно увеличить точность определения доплеровской частоты и связанных с ней информативных параметров. При этом используется частотная модуляция, изменяющаяся по симметричному пилообразному закону, со спектральной обработкой выходного сигнала на растущем и падающем участках. Доплеровская частота вычисляется по взаимно-корреляционной функции огибающих спектров, что позволяет устранить погрешность, обусловленную спектральным составом доплеровского сигнала.

Ключевые слова: эффект Доплера, частотная модуляция, сверхвысокие частоты, датчик, спектральная обработка, взаимно-корреляционная функция.

The method of signal processing of microwave sensors allowing significantly increase the accuracy of Doppler frequency and related informative parameters is proposed. It makes use of symmetric saw-like frequency modulation with spectral processing of the output signal on the rising and falling phase. Doppler frequency is calculated by cross-correlation function envelope of these spectra, which allows to reduce the error due to spectral composition of the Doppler signal.

Key words: Doppler effect, frequency modulation, microwaves, sensor, spectral processing, cross-correlation function.

В настоящее время широко применяются сверхвысоко-частотные (СВЧ) способы измерения скорости объектов, основанные на эффекте Доплера [1]. В радиолокации такими способами определяется скорость движущихся объектов. Доплеровский метод измерения заключается в зондировании движущихся объектов электромагнитными волнами и выделении частоты смещения рассеянной волны. Если приёмо-передающая антенна источника излучения с несущей частотой f_0 направлена на движущийся со скоростью v объект, то частота принятой антенной отраженной волны будет отличаться на доплеровскую частоту f_D , выражаемую как

$$f_D = 2v \cos \alpha / \lambda_0, \quad (1)$$

где α — угол между направлением на объект и вектором скорости; $\lambda_0 = c_B / (f_0 \sqrt{\epsilon})$ — длина волны в среде измерения (воздухе); ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, для воздуха $\epsilon = 1$; c_B — скорость света в воздухе.

Таким образом, по доплеровской частоте из (1) можно вычислить скорость объекта по формуле

$$v = c_B f_D / (2 \cos \alpha \sqrt{\epsilon} f_0). \quad (2)$$

При традиционном радиолокационном применении эффекта Доплера объект можно считать точечным, поэтому доплеровская частота определяется единственной гармоникой и погрешность её измерения будет минимальной. Однако при использовании этого эффекта в датчиках путевой скорости транспортных средств или для нахождения расхода жидких и сыпучих сред в трубопроводах точное определение доплеровской частоты является более сложным. В первом случае отражение происходит от подстилающей поверхности, приёмо-передающая антенна датчика находится на движущемся объекте и направлена под углом α к поверхности. Диаграмма направленности антенны имеет не-

которую конечную ширину Θ , поэтому принимаемый отражённый сигнал является суперпозицией волн, отразившихся от поверхности под разными углами, и спектр доплеровского сигнала расширяется. Во втором случае аналогичный эффект происходит при отражении сигнала несущей частоты от диэлектрических неоднородностей в потоке жидкой или сыпучей среды, которые зачастую имеют еще и некоторую турбулентную составляющую. При этом также влияет диаграмма направленности антенны. Определение доплеровской частоты по максимуму спектральной плотности не обеспечивает достаточной точности из-за широкого и неравномерного спектра доплеровского сигнала [2].

Для устранения нежелательного влияния расширения спектра доплеровского сигнала на точность измерения его истинной частоты применяются различные способы. Так, в датчиках путевой скорости осуществляется совместная обработка сигналов двух датчиков, антенны которых направлены под разными углами к подстилающей поверхности [3, 4]. Данный подход позволяет несколько повысить точность определения доплеровской частоты. Однако это достигается фактически за счёт удвоения числа СВЧ-компонентов — наиболее дорогостоящих составляющих частей структурной схемы, что неэффективно с экономической точки зрения. Данное обстоятельство заставляет искать более дешёвые альтернативные способы повышения точности измерений с использованием модуляции и специальных алгоритмов обработки сигналов.

Частотная модуляция по симметричному пилообразному закону. В радиолокации известен способ нахождения радиальной скорости объекта и текущего расстояния до него с помощью симметричной пилообразной частотной модуляции (СПЧМ) [2]. На рис. 1 приведены временные зависимости частоты доплеровского датчика расстояния и скорости: излучаемый (линия 1) и принимаемые отражённые СВЧ-сигналы с СПЧМ при неподвижном объекте (линия 2) и движении объекта с радиальной скоростью v_r (линия 3) при его приближении. Линия 4 соответствует сигналам частот биений f_b (разностных частот), образующихся после выделения разности между излучаемой и принимаемой волнами на выходе датчика. При неподвижном объекте частота биений имеет вид

$$f_b = 2\Delta f L \sqrt{\epsilon} / (c_B T_M), \quad (3)$$

где $\Delta f = f_2 - f_1$; f_1, f_2 — начальная и конечная частоты диапазона девиации частот СВЧ-генератора; L — расстояние от датчика до объекта; T_M — полупериод модуляции.

При приближении объекта частоты биений на растущем и падающем участках частотной модуляции соответственно $f_{b1} = f_b - f_D$; $f_{b2} = f_b + f_D$. Измерив эти частоты, можно вычислить $f_b = (f_{b1} + f_{b2})/2$; $f_D = (f_{b2} - f_{b1})/2$. Затем по (3) рассчитать расстояние L и по (2) при угле $\alpha = 0$ — радиальную скорость v_r объекта. В данном случае можно принять $f_0 = (f_2 - f_1)/2$, поскольку несущая частота много больше частоты биений.

Определение путевой скорости доплеровским датчиком с СПЧМ. При нахождении путевой скорости объектом является подстилающая поверхность дороги, датчик располагается на передней части транспортного средства (автомобиле или локомотиве) на расстоянии R над дорогой. Антенна расположена под углом α вперёд и вниз по направлению движения. Влияние диаграммы направленности при-

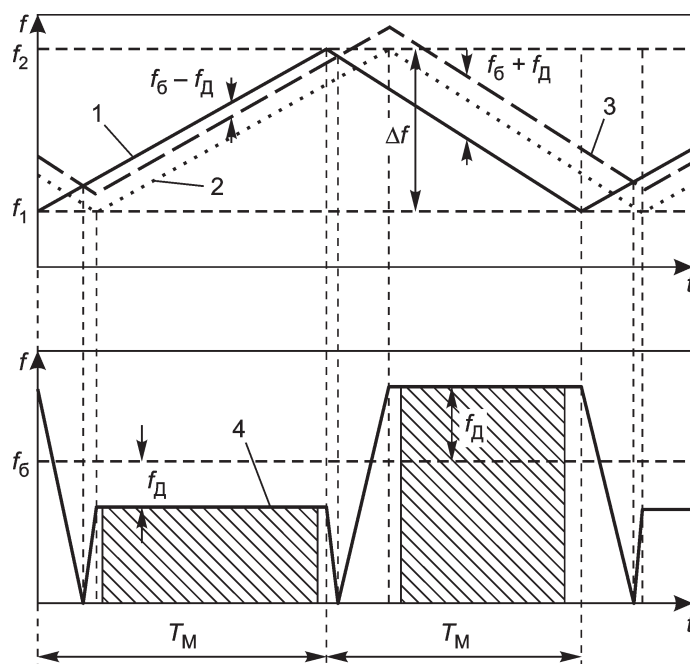


Рис. 1. Временные диаграммы датчика расстояния и скорости с применением симметричной пилообразной частотной модуляции: 1—3 — сигналы излучаемый и принимаемые при неподвижном объекте и движущемся с радиальной скоростью, соответственно; 4 — сигнал биений на выходе датчика

водит к возникновению спектра сигнала биений конечной ширины. В случае $v = 0$ спектр сигнала биений можно выразить как

$$S_0(f) = \left(2\Delta f R \sqrt{\epsilon} / c_B T_M \right) \sum_{i=1}^{i=n} \varphi_i / \sin(\alpha_i), \quad (4)$$

где φ_i — выборки функции, описывающей диаграмму направленности; $i = 1, 2, \dots, n$ — число равномерных выборок функции при $\alpha - \Theta/2 \leq \alpha_i \leq \alpha + \Theta/2$. Следует отметить, что этот спектр на растущем и падающем участках частотной модуляции будет одинаковым.

При движении вперёд спектр на растущем участке уменьшается на значение доплеровской частоты $S_1(f) = S_0(f) - f_D$ и увеличивается на то же значение на падающем участке $S_2(f) = S_0(f) + f_D$. На рис. 2 эти спектры приведены в относительных координатах и для наглядности наложены друг на друга. Чтобы избежать искажений, выборки для вычисления спектров необходимо брать из зон, где отсутствует обращение сигнала (см. рис. 1, заштрихованные области). Если теперь вычислять функцию взаимной корреляции между спектрами на растущем и падающем участках СПЧМ, то её максимум будет соответствовать удвоенной доплеровской частоте (рис. 3). Подобный подход был использован для анализа сигналов мультисенсорных СПЧМ-датчиков с целью повышения надёжности показаний [5]. Максимум кривой взаимно-корреляционной функции чётко выражен и определяется значительно точнее, чем по спектру принимаемого сигнала (см. рис. 2). Это обуславливает более высокую точность определения доплеровской частоты с применением взаимно-корреляционной функции.

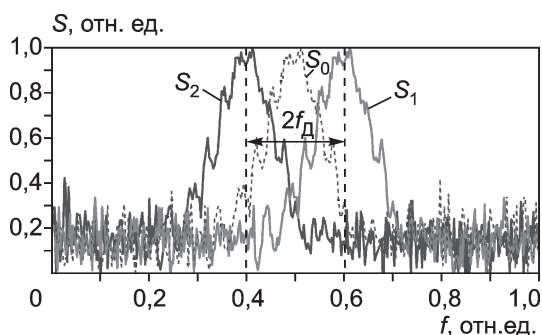


Рис. 2. Спектральные характеристики доплеровского сигнала при использовании спектральной пилообразной частотной модуляции

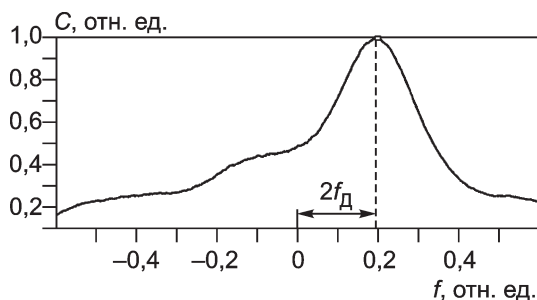


Рис. 3. График функции взаимной корреляции спектров сигнала на растущем и падающем участках

Таким образом, по формуле (2) можно точно вычислить путевую скорость, несмотря на сложный спектральный состав сигнала биений, включая доплеровскую составляющую. Следует отметить, что данный способ измерения не критичен к таким параметрам генератора и других СВЧ-компонентов датчика, как стабильность и линейность амплитудно-частотной характеристики, что позволяет существенно удешевить устройство в целом. Дополнительно можно снизить влияние помех от частот вибрации, попадающих в полосу спектра сигнала биений.

Определение расхода жидких и сыпучих сред в трубопроводах доплеровским датчиком с СПЧМ. Для контроля расхода жидких и сыпучих сред также применяются СВЧ-датчики на основе эффекта Доплера [2]. Излучаемые антенной волны через радиопрозрачное окно в стенке трубопровода поступают внутрь него под углом α к направлению потока и рассеиваются на неоднородностях движущейся жидкости.

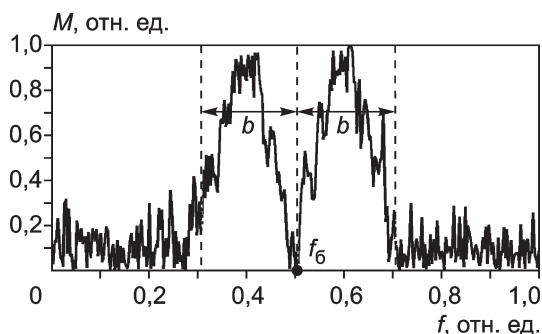


Рис. 4. График модуля разности спектров сигнала на растущем и падающем участках

Затем волны попадают на приёмную антенну с частотой $f_{отр}$, отличной от частоты f_0 зондирующей волны на доплеровскую частоту f_D . Неоднородностями в измеряемой жидкой среде при этом могут быть газовые и твёрдые включения, а также другие жидкости с иными значениями ϵ . Направления движения неоднородностей образуют различные углы с направлением распространения волн в соответствии с диаграммой направленности. Произвольная ориентация неоднородностей, случайные значения фазы отражённых каждой неоднородностью волн приводят к образованию доплеровского сигнала сложной формы. Тем не менее средняя доплеровская частота связана со средней скоростью потока формулой (1). По объёмной плотности ρ вещества и скорости v потока можно определить средний массовый расход

$$\bar{Q} = A\rho v, \quad (5)$$

где A — площадь поперечного сечения потока на измерительном участке.

Подставив v из (1) в (5), получим

$$\bar{Q} = A\rho c_B f_D / (2f_0 \sqrt{\epsilon} \cos \alpha). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что для точного измерения среднего массового расхода необходимо оценивать изменения диэлектрической проницаемости среды и функционально с ней связанной плотности контролируемого потока. В [2, 6] для измерения массового расхода сред применяют метод СПЧМ вместо классического доплеровского подхода с использованием фиксированной частоты. Здесь по приведённым выше формулам измеряют f_{61} , f_{62} , затем вычисляют f_6 , f_D . Поскольку для датчика расхода расстояние L , являющееся технологическим конструктивным параметром, как и R для датчика скорости, не меняется, ϵ среды распространения можно рассчитать из формулы (3):

$$\epsilon = [c_B T_M f_6 / (2\Delta f L)]^2. \quad (7)$$

По значению ϵ можно судить о текущей плотности среды, поэтому определение расхода по формуле (6) существенно уточняется. Однако точность датчика расхода с СПЧМ при таком классическом радиолокационном подходе будет недостаточной, поскольку в реальных условиях сильно искажаются сигналы и биений, и доплеровский, в связи с чем соответствующие частоты будут определяться с большими погрешностями. Тем не менее при нахождении доплеровской частоты по расчётному положению максимума взаимно-корреляционной функции между спектрами сигнала биений на растущем и падающем участках СПЧМ погрешность значительно уменьшится. Эта процедура ничем не отличается от рассмотренной выше для датчика путевой скорости, кроме отсутствия необходимости определять f_6 , поскольку расстояние до поверхности не менялось, и ϵ воздуха равна единице. Сигнал биений при нулевой скорости потока имеет спектр $S_0(f)$, расположенный на оси симметрии между спектрами $S_1(f)$ и $S_2(f)$ (см. формулу (4) и рис. 3). Вначале находят модуль разности спектров $M(f) = |S_2(f) - S_1(f)|$, а затем часто-

ту f_6 перебором в диапазоне спектров $S_1(f)$, $S_2(f)$ до соблюдения условия

$$\int_{f_6}^{f_6-b} M(f)df = \int_{f_6}^{f_6+b} M(f)df,$$

где b — диапазон частот, обусловленный возможной шириной полосы частот сигнала биений и доплеровских частот, связанных с вероятными скоростями потока.

Таким образом, площади суммарного спектра справа и слева от частоты биения должны быть равны (рис. 4). Зная f_6 , по (7) вычисляются диэлектрическая проницаемость и плотность среды, далее с учётом f_d по (2) определяют скорость и по (6) — массовый расход среды в потоке.

На практике зачастую не требуется непосредственно находить абсолютные значения ϵ , ρ , достаточно лишь контролировать их относительные изменения. Для этого предлагается следующий алгоритм. После определения f_d строится виртуальный нормированный спектр $S_0(f)$ (см. рис. 2). Этот результат сохраняется в памяти и соответствует некоторой известной начальной (отсчётной) плотности вещества. При дальнейшей работе периодически измеряется и вычисляется новое текущее значение $S_{0T}(f)$ и рассчитывается взаимно-корреляционная функция между $S_0(f)$, $S_{0T}(f)$. Если значение ϵ изменится на $\pm\Delta\epsilon$, то аналогично относительно нуля изменится и частотный сдвиг максимума этой функции $\pm\Delta f_{\max}$: из (7) следует, что $\Delta\epsilon \sim \Delta f_{\max}^2$.

Выводы. Приведённые примеры применения корреляционного метода в доплеровских датчиках с использованием СПЧМ для измерений путевой скорости и массового расхода жидких и сыпучих сред объединяет одно обстоятельство — постоянство расстояния от датчика до объекта. Метод СПЧМ при определении путевой скорости классического объекта является информационно избыточным. При этом он позволяет учесть спектральные искажения доплеровского сигнала при корреляционной обработке спектров на растущем и падающем участках. Эти искажения возникают вследствие паразитных отражений из-за конечности шири-

ны диаграммы направленности антенны датчика. Также можно учесть данные искажения и помехи от неравномерности движения неоднородностей при измерении скорости потока. Поскольку взаимная корреляция осуществляется между практически одинаковыми спектрами, то её максимум ярко выражен и определяется точнее, чем в спектре сигнала. Дополнительно, с помощью предложенной специальной обработки спектров удаётся определить частоту биений, а по ней — диэлектрическую проницаемость и плотность среды. В результате можно достаточно точно вычислить массовый расход. При этом, несмотря на использование частотной модуляции, требования к стабильности и линейности частотных характеристик всех элементов структурной схемы датчиков в данном случае не будут жёсткими, что снижает стоимость этих устройств.

Л и т е р а т у р а

1. **Финкельштейн М. И.** Основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1973.
2. **Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. **Пат. 2334995 РФ.** Доплеровский измеритель путевой скорости / Варин А. П. // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 9.
4. **Heide P., Schubert R., Mágori V., Schwarte R.** A High Performance Multisensor System for Precise Vehicle Ground Speed Measurement // Microwave J. 1996. V. 39. No. 7. P. 22—34.
5. **Ruser H., Magori V., Trankler H.-R.** Correlated microwave-ultrasonic multi-sensor for reliable measurements of velocity and range // Proc. 19th IEEE Instrumentation and Measurements Technology Conf., IMTC. 2002. V. 1. P. 25—30.
6. **А. с. 896418 СССР.** Устройство для измерения массового расхода жидких и сыпучих сред / Викторов В. А., Ахобадзе Г. Н. // Бюллетень изобретений. 1982. № 1.

Дата принятия: 12.01.2017.