

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА НА РАБОТУ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РЕТРАНСЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Введение

Совершенствование технологий и рост их сложности выдвигает дополнительные требования к точности и надежности оценки параметров технологических процессов. Одним из неизбежных факторов, препятствующих повышению точности в промышленных условиях, является производственная вибрация, уровень которой возможно и необходимо уменьшать до определенного предела, определяемого техническими требованиями к оборудованию и санитарными нормами. Вибрация контролируемой поверхности является существенным дестабилизирующим фактором, заметно влияющим на надежность и точность измерений прецизионных датчиков СВЧ и оптического диапазонов [1, 2].

В число предложенных радиоволновых датчиков и систем контроля объектов на малых расстояниях входят измерительные ретрансляционные системы (ИРС), в которых применяется пространственно-временная фильтрация, позволяющая добиться значительного повышения точности измерений в условиях помеховых отражений от посторонних предметов [3]. Ранее не изучалось влияние вибрации контролируемой поверхности на точность оценок, получаемых ИРС. Однако проведение таких исследований актуально, поскольку вибрация контролируемой поверхности вносит непосредственный вклад в фазовый набег радиоволны, являющийся информационным параметром ИРС.

Цель статьи – изучение влияния вибрации на работу ИРС, а также нахождение способа ее снижения. Для этого необходимо решить следующие задачи: путем математического моделирования работы ИРС и вибрационного воздействия исследовать степень влияния вибрации на точность оценок ИРС в разных частотных диапазонах виброперемещений; изучить поведение погрешности измерений от соотношения периода виброперемещения и длительности измерительного интервала; решить упомянутые задачи для случая полигармонического воздействия; на основе анализа полученных данных предложить алгоритм снижения влияния вибрации на точность оценок, даваемых ИРС.

Влияние вибрации на фазовый набег в ИРС

Физические основы и принцип работы ИРС подробно описаны в [4]. На рис. 1 показана структура ИРС, где 1 – приемо-передатчик; 2 – ретранслятор; 3, 4 – антенны приемопередатчика и ретранслятора; 5 – контролируемая поверхность. В случае ИРС радиоволна дважды отражается от контролируемой поверхности и дважды проходит трассу распространения длиной R , а значит, вибрация поверхности воздействует на радиоволну дважды. В данной работе будем полагать, что ИРС излучает непрерывное немодулированное колебание, в приемнике используется супергетеродинное преобразование [5], а контролируемая поверхность совершает плоско-параллельные движения в направлении ИРС по гармоническому закону: $d = D_m \sin(\Omega t + \Phi_0)$, где D_m – амплитуда колебаний поверхности, $\Omega = 2\pi F$ – круговая частота вибрации, Φ_0 – начальная фаза колебаний поверхности.

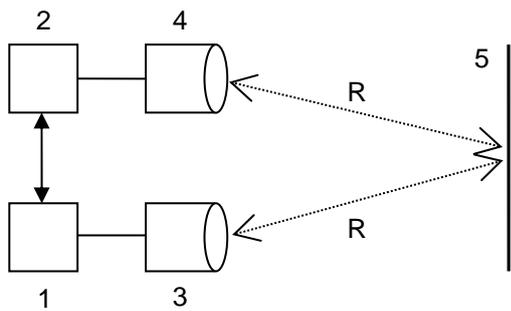


Рис. 1

Мгновенная фаза колебания, принятого антенной ретранслятора 4, описывается выражением

$$\psi_{\text{прм}}(t) = \omega t + \varphi_0 + \varphi_{\text{опр}} + 2 \frac{\omega(R+d)}{c}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота колебаний передатчика, φ_0 – их начальная фаза, $\varphi_{\text{опр}}$ – фазовый сдвиг при отражении волны от поверхности 5, c – скорость света. В последнем слагаемом выражения (1) можно выделить составляющую, которая описывает вклад вибрации в полную фазу колебаний, принимаемых антенной 4:

$$\varphi_{\text{вбр}}(t) = 2 \frac{\omega d}{c} = 2 \frac{v_m}{c} \sin(\Omega t + \Phi_0) = \frac{4\pi D_m}{\lambda} \sin(\Omega t + \Phi_0) = m \sin(\Omega t + \Phi_0), \quad (2)$$

в котором $v_m = \omega D_m$ – виброскорость, m – индекс угловой модуляции. Следовательно, влияние вибрации поверхности контролируемого объекта выражается в паразитной угловой модуляции отраженной радиоволны. Данный эффект используется в СВЧ виброметрии и смежных областях исследования [6, 7].

При повторном прохождении радиоволновой трассы распространения два последних слагаемых выражения (1) вносят двойной вклад. Полагаем, что частота сдвига в ретрансляторе много меньше частоты излучаемого колебания $\Omega_{\text{сдв}} \ll \omega$ и полная фаза колебания d практически не изменилась с момента первого прохождения трассы радиоволной. Тогда, оставив в рассмотрении лишь полезную спектральную составляющую колебаний, принимаемых антенной 3, запишем выражение для полной фазы:

$$\psi_{\text{прм}}(t) = (\omega + \Omega_{\text{сдв}})t + \varphi_0 + 2 \left[\varphi_{\text{опр}} + 2 \frac{\omega R}{c} + m \sin(\Omega t + \Phi_0) \right]. \quad (3)$$

Моделирование воздействия вибрации

Количественное влияние вибрации контролируемой поверхности на оценку фазового набега принимаемого сигнала $\tilde{\varphi}$ исследовалось с помощью математического моделирования. За основу математической модели работы ИРС супергетеродинного типа были взяты выражения из [5], а структура программы моделирования определяется составом статистической модели ИРС супергетеродинного типа, приведенной в [8]. В данном случае информационный параметр статистической модели α (фазовый набег радиоволны) дополняется вибрационной составляющей (2). Воздействие вибрации на неинформационный параметр β описывается побочной амплитудной модуляцией, имеющей место при модуляции угловой.

Моделирование производилось для следующих фиксированных параметров модели: измерительный интервал $T_{\text{изм}} = 50 \text{ мс}$, промежуточная частота $f_{\text{ПЧ}} = 5 \text{ МГц}$, частота сдвига $F_{\text{сдв}} = 0,1 \text{ МГц}$, полоса пропускания усилителя промежуточной частоты $\Delta f_{\text{ПЧ}} = 0,5 \text{ МГц}$, частота дискретизации АЦП приемника $f_{\text{д}} = 20 \text{ МГц}$, отношение сигнал / шум на входе приемника $ОСШ = 20 \text{ дБ}$. Фазовые сдвиги φ_0 , $\varphi_{\text{опр}}$ и Φ_0 принимались равными нулю, а фазовый набег радиоволны $\varphi = 4\omega R/c$ – равным 10° . Данные получены на основании 10^4 опытов.

На рис. 2 представлены кривые зависимостей оценки фазового набега $\tilde{\varphi}$ от величины виброскорости для трех различных частот колебаний вибрации $F : 3, 15$ и 75 Гц. В соответствии с санитарными нормами [9] для этих частот значения виброскоростей в 7,6, 2,8 и 2,3 мм/с соответственно являются предельно допустимыми. Из рисунка видно, что воздействие вибраций, величины которых даже на порядок ниже предельных значений, заметно сказывается на оценках фазового набега, что существенно отразится на точности измерений.

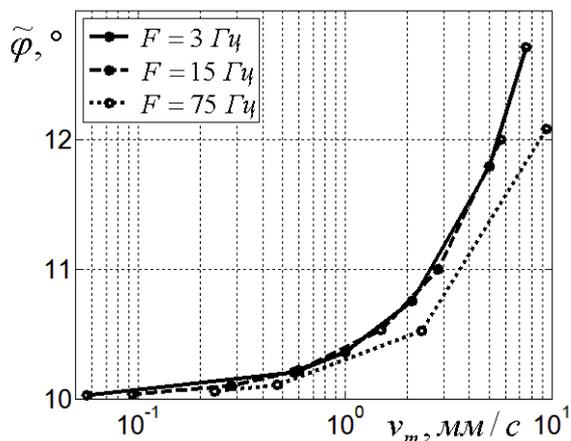


Рис. 2

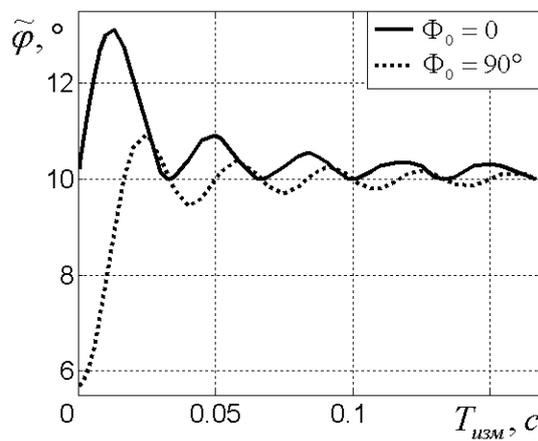


Рис. 3

Дальнейшие исследования были направлены на изучение возможности снижения влияния вибрации на $\tilde{\varphi}$. Исходя из предположения о том, что за полный период колебания вибрации $T = 1/F$ влияние его положительной и отрицательной полуволн компенсируется, были получены и исследованы зависимости $\tilde{\varphi}$ от интервала измерений $T_{изм}$. Графики этих зависимостей для частоты вибрации $F = 30$ Гц и двух значений начальной фазы Φ_0 в 0° и 90° показаны на рис. 3. Видно, что когда длительность измерительного интервала $T_{изм}$ кратна периоду T , влияние вибрации отсутствует. Для величины начальной фазы колебания вибрации $\Phi_0 = 90^\circ$ это влияние отсутствует также, когда значения $T_{изм}$ кратны половине периода T . На практике установление величины Φ_0 едва ли является разрешимой задачей, поэтому вторая зависимость носит чисто демонстративный характер.

Конечно, колебание контролируемой поверхности, подчиняющееся гармоническому закону, является лишь частным и наиболее простым случаем. В ряде других практических ситуаций возможны периодические колебания сложной формы [10, 11]. Например, колебания в виде ограниченной синусоиды, близкие к треугольной, пилообразной, прямоугольной и т.п., спектр которых представляется рядом гармоник с кратными частотами $k \cdot F$, $k = 1, 2, 3, \dots$. Не исключены также и воздействия колебаний, являющихся суммой нескольких гармонических колебаний с некратными частотами или же суммой более сложных периодических колебаний.

Влияние сложных вибрационных воздействий также было изучено в работе. На рис. 4, кривая 1 показано воздействие, представляющее собой первые пять гармоник пилообразного колебания: $d_1 = D_m [\sin(\Omega t) - \frac{1}{2} \sin(2\Omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\Omega t) - \frac{1}{4} \sin(4\Omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\Omega t)]$. Кривая 2 – сумма двух гармонических колебаний с некратными частотами: $d_2 = D_m [\sin(2\Omega t) - \frac{1}{2} \sin(3\Omega t)]$. Результаты их воздействия на оценку фазового набега принимаемого сигнала $\tilde{\varphi}$ с параметром $F = 30$ Гц показаны на рис. 5. Видно, что для воздействия d_1 (кривая 1) оценка $\tilde{\varphi}$ стре-

мится к φ , когда значение $T_{изм}$ кратно периоду T , поскольку данное воздействие есть сумма нескольких гармоник.

Для случая воздействия d_2 поведение $\tilde{\varphi}$ является более сложным (кривая 2). Однако здесь можно выделить характерную особенность: влияние вибрационного воздействия плавно снижается до нуля для значений $T_{изм} = k/F_{НОД}$, где $F_{НОД}$ – частота, являющаяся наибольшим общим делителем для частот колебаний, образующих рассматриваемое воздействие. Для воздействия d_2 $F_{НОД} = 30$ Гц. Имеются также и другие значения $T_{изм}$, при которых $\tilde{\varphi}$ стремится к φ . В этих случаях, по всей видимости, основное влияние вносят комбинации начальных фаз колебаний, образующих воздействие.

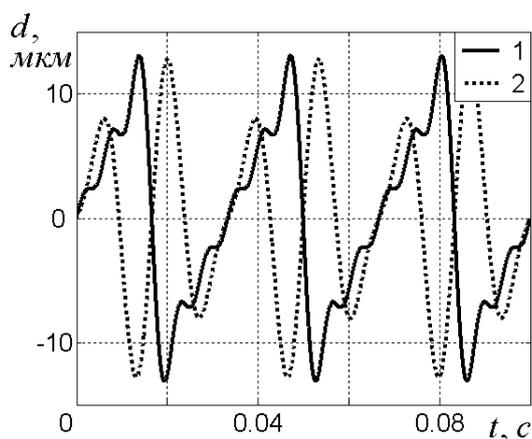


Рис. 4

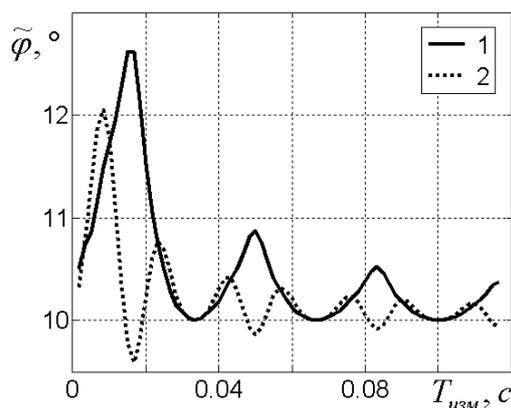


Рис. 5

Алгоритм снижения влияния вибрации

Ослабление влияния вибрации на погрешности измерения может быть получено за счет спектральной и корреляционной обработки отраженного сигнала. Для обработки сигнала, принятого ИРС, может использоваться способ, применяемый в [12]. При этом способе с помощью автокорреляционной функции определяются гармонические составляющие и их частоты в дискретных сигналах. В идеальном случае, когда отсутствует вибрация контролируемого объекта и антенно-волноводного тракта самого датчика, спектр сигнала ПЧ будет представлен единственной составляющей с частотой, равной $f_{ПЧ} + F_{сдв}$, т.е. полезным колебанием. Поскольку полоса пропускания цифрового фильтра накопления равна всего лишь нескольким сотням герц, составляющие с частотами $f_{ПЧ} - F_{сдв}$ и $f_{ПЧ}$ эффективно подавляются [5]. Когда же вибрация имеет место, вокруг полезного колебания появляются дополнительные спектральные составляющие с частотами $(f_{ПЧ} + F_{сдв}) \pm nF_1 \pm kF_2 \pm \dots$, $n, k = 1, 2, 3, \dots$. Их число и амплитуды будут определяться значением индекса угловой модуляции m .

Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 6. На первом шаге для дискретизированной выборки сигнала ПЧ вычисляется частотно-временная автокорреляционная функция (в соответствии с [12]) и затем, по найденной функции, определяются центральные частоты и уровни спектральных составляющих сигнала ПЧ. На третьем шаге, в соответствии с выбранным порогом, производится селекция составляющих по уровню, чтобы исключить из рассмотрения вибрационные воздействия, уровень которых не вносит заметный вклад в погрешность измерений. Если на выходе нет дополнительных спектральных составляющих (частоты которых отличны от частоты полезной составляющей $f_{ПЧ} + F_{сдв}$), считается, что

вибровоздействия отсутствуют, и длительность измерительного интервала $T_{изм}$ устанавливается равной некоторому фиксированному значению $T_{фикс}$. Если же обнаруживаются одна или несколько составляющих, сопоставляются значения их центральных частот. В случае кратных частот длительность измерительного интервала принимается равной $T_{изм} = k/F_{A(1)}$, где $F_{A(1)}$ – центральная частота составляющей с наименьшей центральной частотой. В случае с некратными частотами требуется вычислить частоту $F_{НОД}$. Длительность измерительного интервала в этом случае устанавливается как $T_{изм} = k/F_{НОД}$.

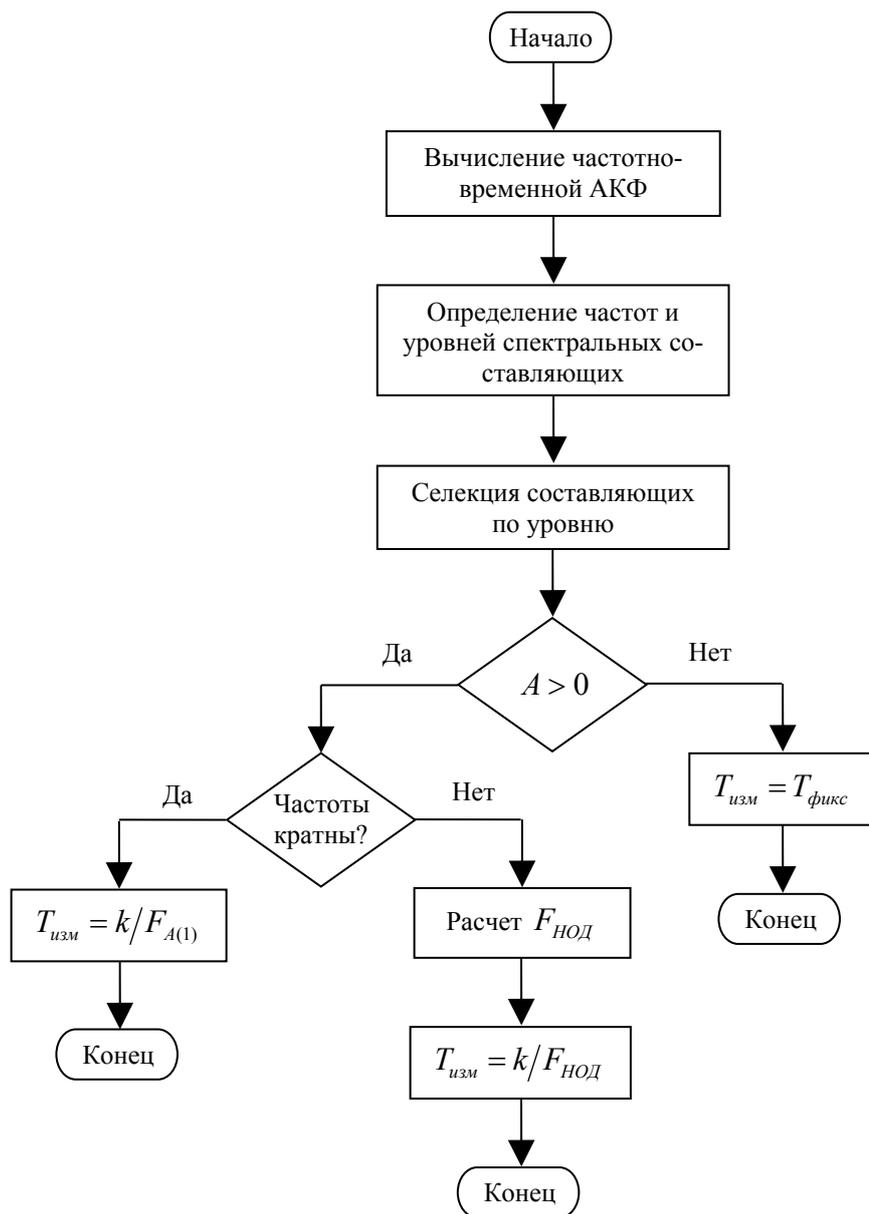


Рис. 6

Результаты моделирования дают основание полагать, что предложенный алгоритм позволит снизить влияние сложных вибрационных воздействий на точность измерений. Однако его эффективность будет зависеть от ряда условий, например, от величины порога селекции

дополнительных спектральных составляющих, от максимально возможной длительности измерительного интервала, от сложности вибровоздействия и т.д. Оценка эффективности предложенного алгоритма при различных методах обработки принятого сигнала и вибрационных воздействиях, имеющих разный спектральный состав и стохастические характеристики, является предметом дальнейших исследований.

Выводы

В результате исследований получены зависимости оценок фазового набега радиоволны $\tilde{\varphi}$ в ИРС от виброскорости в трех частотных диапазонах виброперемещений для гармонического вибровоздействия. Установлено, что даже при виброскоростях, которые на порядок меньше предельно допустимых санитарных норм, появляются существенные погрешности в оценке фазового набега радиоволны. Определено, что погрешность, вносимая вибровоздействием, существенно зависит от длительности измерительного интервала $T_{изм}$ и обращается в ноль, когда $T_{изм}$ кратна периоду виброперемещения. Выявлено значительное влияние начальной фазы виброперемещения на величину погрешности и на появление точек, в которых влияние виброперемещения обнуляется при некоторых значениях интервала измерения $T_{изм}$.

Получены зависимости $\tilde{\varphi}$ от $T_{изм}$ для полигармонических воздействий как частных случаев вибровоздействия сложной формы, что, тем не менее, позволило выявить важную закономерность: если установить длительность измерительного интервала $T_{изм} = k/F_{НОД}$, то влияние вибрации устраняется.

На основе полученных результатов разработан алгоритм для снижения влияния вибрации на $\tilde{\varphi}$.

Список литературы: 1. *Radar measurements with micrometer accuracy and nanometer stability using an ultra-wideband 80 GHz radar system* // N. Pohl, T. Jaschke, S. Scherr, S. Ayhan, M. Pauli, T. Zwick, T. Musch. 2013 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet). P. 31 – 33. DOI: 10.1109. 2. *Barbon F., Vinci G., Lindner S., Weigel R., Koelpin A. A Six-Port Interferometer Based Micrometer-Accuracy Displacement and Vibration Measurement Radar* // Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, June 17-22, 2012, P. 1 – 3. 3. *Величко А.Ф., Величко Д.А.* Ретрансляционный метод измерения и подавления помеховых отражений при непрерывном излучении с частотной модуляцией // Известия вузов «Радиоэлектроника». – 1998. – Т. 41, № 11. – С. 3–12. 4. *Величко А.Ф., Величко Д.А., Курбатов И.В., Шокало В.М.* Дистанционные методы и средства для исследования процессов в атмосфере земли. Гл. 8. Дистанционная диагностика технологических параметров. – Харьков : Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники ; Бизнес Информ, 2002. – 426 с. 5. *Величко А.Ф., Величко Д.А., Вдовиченко Е.И.* Селекция сигнала и определение фазового набега радиоволны цифровыми методами в ретрансляционных системах диагностики // Радиотехника. – 2011. – Вып. 165. – С. 258–267. 6. *Костин М.С.* Моделирование системы радиолокационной виброметрии // Технологии информационного общества. – 2013. № 11. – С. 97 – 101. 7. *Пинчук А.Н.* Дистанционное определение амплитуды вибрации корпуса судна // Наука и образование. – 2014. – № 6. – С. 270 – 278. 8. *Величко А.Ф., Величко Д.А., Величко С.А., Вичкань А.В., Клюева А.Н., Нетребенко К.В.* Статистические характеристики сигнала ретрансляционного измерителя супергетеродинного типа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 4 (76). – С. 58—63. 9. *Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.* ДСН 3.3.6.039-99. 10. *Основы измерения вибрации* ; под ред. В.А. Смирнова (http://www.vibration.ru/osn_vibracii_shtml). 11. *Петрухин В.В., Петрухин С.В.* Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. – М. : Инфра-инженерия, 2010. – 176 с. 12. *Аврамчук В.С.* Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2012. – № 5. – Т. 321. – С. 113 – 117.

*Институт радиофизики и электроники
имени А.Я. Усикова НАН Украины*

Поступила в редколлегию 25.10.2016