

Способ бесконтактного трёхкомпонентного измерения вибрации

А. В. ГРИГОРЬЕВ, А. В. ЗАТЫЛКИН, Н. К. ЮРКОВ

Пензенский государственный университет
Пенза, Россия, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Предложен новый способ бесконтактного измерения и анализа параметров вибрационного перемещения элементов радиоэлектронной аппаратуры. Приведено обоснование математического аппарата, связывающего параметры следа вибрационного размытия изображения круглой метки с параметрами вектора амплитуды виброперемещений исследуемой точки на поверхности элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: вибрации, вектор, модуль, направление, изображение, размытие.

A new non-contact measurement and analysis methods for parameters of vibration movement of the radio-electronic equipment elements are offered. The substantiation of the mathematical model enabling to connect the trace parameters of vibration blurring of the round mark image with the vibrodisplacement amplitude parameters of the vector of investigated point on the surface of radio-electronic equipment elements is adduced.

Key words: vibrations, vector, module, direction, image, blurring.

При проектировании и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) важно учитывать влияние внешних воздействующих факторов, в частности вибрационных, на её параметры и характеристики [1]. Множество работ отечественных и зарубежных учёных посвящено решению данной проблемы. В [2] представлены результаты исследований (с применением программного продукта ANSYS) влияния вибраций на излучение зеркальной антенны, в [3] — методика оценки методом Делоне адекватности геометрической модели зеркала антенны, в [4] — методика моделирования излучения с учётом вибрационных воздействий. В [5] применён метод конечных элементов для прогнозирования параметров вибраций элементов зеркальных антенн. В [6] рассмотрена методика исследований динамических характеристик технических систем на основе рассогласования фаз внешнего вибрационного воздействия. Один из вариантов решения проблемы вибрационной защиты регистрирующего устройства описан в [7].

В рассмотренных публикациях отмечено, что важной особенностью исследований является применение бесконтактных способов измерений. В основу способа, приведённого в [8], положены вычисления модуля и направления виброперемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля. Исходные данные для вычислений — результаты бесконтактных измерений геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки нанесённой на объект контроля [9]. Публикация [10] посвящена развитию этого способа, его адаптации к специфике зеркальных антенн. Методика калибровки системы трёхкомпонентного измерения параметров вибраций представлена в [11]. Калибровка системы осуществляется при отсутствии вибраций для определения коэффициентов преобразования растровых единиц изображения (rnp) в микрометры виброперемещения.

Рассмотренные способы позволяют измерять амплитуду, но не дают возможности определять направление вибрационных перемещений исследуемой точки (что необходимо для расчёта и уточнения диаграммы направленности зеркальных антенн). Поэтому разработка нового способа бесконтактного измерения и анализа параметров вибрационного перемещения элементов радиоэлектронной аппаратуры является актуальной научно-практической задачей.

Способ бесконтактного трёхкомпонентного измерения вибрационного перемещения элементов РЭА. На поверхность элемента РЭА наносят круглые метки, центрами тяжести которых являются исследуемые точки. Изображения меток регистрируются одной или несколькими видеокамерами. Положение каждой видеокамеры фиксирует система виброзащиты, например, представленная в [7]. В результате вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности зеркальной антенны формируется след размытия изображения метки, примерная конфигурация которого показана на рис. 1. Центры тяжести изображения метки в исходной позиции при отсутствии вибраций (исходное изображение метки) и в крайне правой позиции вибрационного пе-

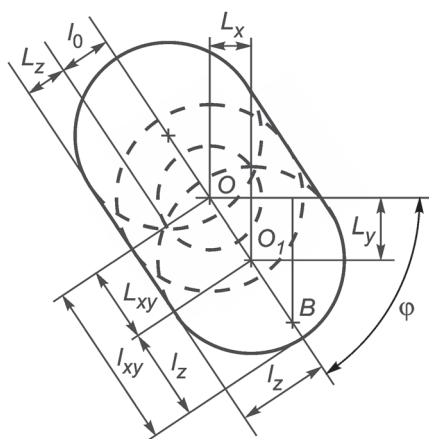


Рис. 1. Примерная конфигурация следа вибрационного размытия изображения круглой метки

ремещения — точки O, O_1 , соответственно. Длина отрезка OO_1 — амплитуда вибрационного перемещения центра тяжести изображения метки. Из перечисленного выше следует, что

$$A_{xy} = p_{xy} L_{xy}, \quad (1)$$

где A_{xy} — проекция вектора амплитуды виброперемещения исследуемой точки на плоскость изображения, выраженная в микрометрах; L_{xy} — амплитуда вибрационного перемещения центра тяжести изображения метки, выраженная в растровых единицах гип ; p_{xy} — коэффициент пропорциональности.

Вибрационное перемещение исследуемой точки, перпендикулярное плоскости изображения, приводит к модуляции радиуса изображения метки. Между этими параметрами существует прямо пропорциональная зависимость

$$A_z = p_z L_z, \quad (2)$$

где A_z — проекция вектора амплитуды виброперемещения исследуемой точки на направление, перпендикулярное плоскости изображения; L_z — вибрационное приращение радиуса изображения метки; p_z — коэффициент пропорциональности.

Из рис. 1 следует, что

$$L_{xy} = l_{xy} - l_z; \quad (3)$$

$$L_z = l_z - l_0; \quad (4)$$

$$L_x = L_{xy} \cos \varphi; \quad (5)$$

$$L_y = L_{xy} \sin \varphi, \quad (6)$$

где l_{xy}, l_z — полудлина и полуширина следа вибрационного размытия изображения круглой метки; l_0 — радиус исходного изображения метки; L_x, L_y — абсцисса и ордината вектора амплитуды вибрационного перемещения центра тяжести изображения метки; φ — угол наклона следа вибрационного размытия изображения метки.

Абсцисса и ордината вектора амплитуды вибрационного перемещения исследуемой точки равны

$$A_x = p_{xy} L_x; \quad (7)$$

$$A_y = p_{xy} L_y. \quad (8)$$

На рис. 1 некоторая точка B расположена на луче OO_1 :

$$\varphi = \arctg [(B_y - O_y)/(B_x - O_x)], \quad (9)$$

где B_x, B_y — абсцисса и ордината точки B ; O_x, O_y — абсцисса и ордината точки O .

Параметры $O_x, O_y, l_0, p_{xy}, p_z$ определяют на этапе калибровки системы при отсутствии вибраций [11]. Параметры O_x, O_y получают при построчном считывании изображения по формулам [12]:

$$O_y = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \xi_0(i, j) / n_{p0};$$

$$O_x = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J j \xi_0(i, j) / n_{p0},$$

где i, j, I, J — порядковые номера строки, столбца и количество строк, столбцов матрицы цифрового растрового изобра-

жения, соответственно; n_{p0} — количество пикселей, составляющих исходное изображение метки; $\xi_0(i, j)$ — функция, принимающая значение равное единице, если пиксел, расположенный на пересечении i -й строки и j -го столбца, принадлежит изображению метки при отсутствии вибраций, и нулю — при невыполнении этого условия.

Количество пикселей n_{p0} при построчном считывании изображения можно записать как

$$n_{p0} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \xi_0(i, j).$$

Количество пикселей, составляющих некоторую область растрового изображения, равно площади этой области, измеренной в квадратных растровых единицах гип^2 . Изображение метки имеет круглую форму, поэтому:

$$l_0 = (n_{p0} / \pi)^{1/2}. \quad (10)$$

Коэффициент пропорциональности p_{xy} в (1), (7), (8) получают из следующего соотношения:

$$p_{xy} = (S_0 / n_{p0})^{1/2},$$

где S_0 — реальная площадь метки, измеренная в микрометрах в квадрате.

Чтобы определить коэффициент пропорциональности p_z в (2) видеокамеру приближают к метке на некоторое расстояние A_{z1} . Рассчитывают коэффициент p_z по формуле

$$p_z = A_{z1} / L_{z1},$$

где L_{z1} — приращение радиуса изображения метки, обусловленное приближением к ней регистрирующего устройства; $L_{z1} = l_{z1} - l_0$, l_{z1} — радиус изображения метки на приближенной позиции при отсутствии вибраций.

Запишем l_{z1} аналогично (10):

$$l_{z1} = (n_{p1} / \pi)^{1/2},$$

где n_{p1} — количество пикселей изображения метки на приближенной позиции при отсутствии вибраций.

Таким образом, для измерений компонентов и модуля вектора амплитуды вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности зеркальной антенны необходимо измерить параметры l_{xy}, l_z, B_x, B_y — полудлину, полуширину следа вибрационного размытия изображения метки, абсциссу и ординату точки B , соответственно.

Методика измерений этих параметров заключается в следующем. Каждому пикселу следа вибрационного размытия изображения метки ставится в соответствие отсчет $r(i, j)$ его характеристического расстояния, т. е. расстояния от центра данного пиксела до центра тяжести исходного изображения метки, округленного до целого числа растровых единиц (рис. 2. а).

Характеристическое расстояние пиксела вычисляется в процессе построчного считывания изображения по формуле

$$r(i, j) = \text{round} \sqrt{(i - O_y)^2 + (j - O_x)^2},$$

где round — оператор округления числа.

Далее формируются отсчётные сегменты следа вибрационного размытия изображения метки. Отсчётный сегмент представляет область связанных пикселей, имеющих одно и то же характеристическое расстояние. Отсчётному сегменту

присваивается и ставится в соответствие каждому его пикселу порядковый номер. Маркировка сегментов осуществляется по методике, предложенной в [13] (рис. 2. б). Отсчётные сегменты формируются в виде колец (сегменты 5—9) и дуг (сегменты 1—4 и 10—13). Максимальное характеристическое расстояние отсчётного сегмента-кольца — это полуширина следа вибрационного размытия изображения метки l_z . Максимальное характеристическое расстояние сегмента-дуги — это полудлина следа вибрационного размытия изображения метки l_{xy} . Сегмент-кольцо от сегмента-дуги система отличает по положению центра тяжести: если центр тяжести сегмента совпадает с центром тяжести исходного изображения метки с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,5$ гуп, то это сегмент-кольцо. В противном случае это сегмент-дуга.

При построчном считывании координаты центра тяжести каждого отсчётного сегмента определяются как

$$n_n(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \xi_s(m, i, j),$$

где $n_n(m)$ — количество пикселей m -го отсчётного сегмента; $\xi_s(m, i, j)$ — функция, принимающая значение, равное единице, если j -й пиксел i -й строки принадлежит m -му отсчётному сегменту, и нулю — в противном случае,

$$i_c(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J i \xi_s(m, i, j) / n_n(m);$$

$$j_c(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J j \xi_s(m, i, j) / n_n(m),$$

где $i_c(m)$, $j_c(m)$ — ордината и абсцисса центра тяжести m -го отсчётного сегмента.

Затем составляется структурное описание отсчётных сегментов, содержащее порядковый номер m каждого сегмента, характеристическое расстояние его пикселей $r(m)$, абс-

циссу и ординату его центра тяжести — $j_c(m)$, $i_c(m)$, соответственно. Для диаграмм (см. рис. 2) структурное описание отсчётных сегментов выглядит следующим образом (таблица).

Структурное описание отсчётных сегментов

m	$r(m)$, гуп	$j_c(m)$, гуп	$i_c(m)$, гуп
1	8	3,500	2,750
2	7	4,625	3,375
3	6	5,625	3,875
4	5	5,800	5,500
5	4	8,000	9,000
6	3	8,000	9,000
7	2	8,000	9,000
8	1	8,000	9,000
9	0	8,000	9,000
10	5	10,200	12,500
11	6	11,180	13,360
12	7	11,375	14,625
13	8	12,500	15,250

Координаты центра тяжести исходного изображения метки: $O_x = 8$ гуп, $O_y = 9$ гуп. Из таблицы следует, что координаты центров тяжести отсчётных сегментов 5—9 совпадают с координатами центра тяжести исходного изображения метки с абсолютной погрешностью не превышающей $\pm 0,5$ гуп. Эти сегменты определяются системой как сегменты-кольца. Что касается всех остальных отсчётных сегментов, то для них указанное условие не выполняется. Поэтому система

идентифицирует эти сегменты как сегменты-дуги. Среди сегментов-колец наибольшее характеристическое расстояние пикселей имеет сегмент 5. Это характеристическое расстояние равно 4 гуп. Следовательно, $l_z = 4$ гуп. Среди сегментов-дуг наибольшее характеристическое расстояние пикселей имеют сегменты 1 и 13. Это характеристическое расстояние равно 8 гуп. Следовательно, $l_{xy} = 8$ гуп.

Центры тяжести отсчётных сегментов-дуг лежат на прямой, проходящей через точки O , O_1 и точку B (см. рис. 1). Для вычисления угла φ по (9) достаточно определить координаты точки B (координаты точки O известны). В качестве точки B оптимально принять центр тяжести отсчётного сегмента, для которого выполняются следующие условия: сегмент является дугой; $j_c(m) > O_x \cup (j_c(m) =$

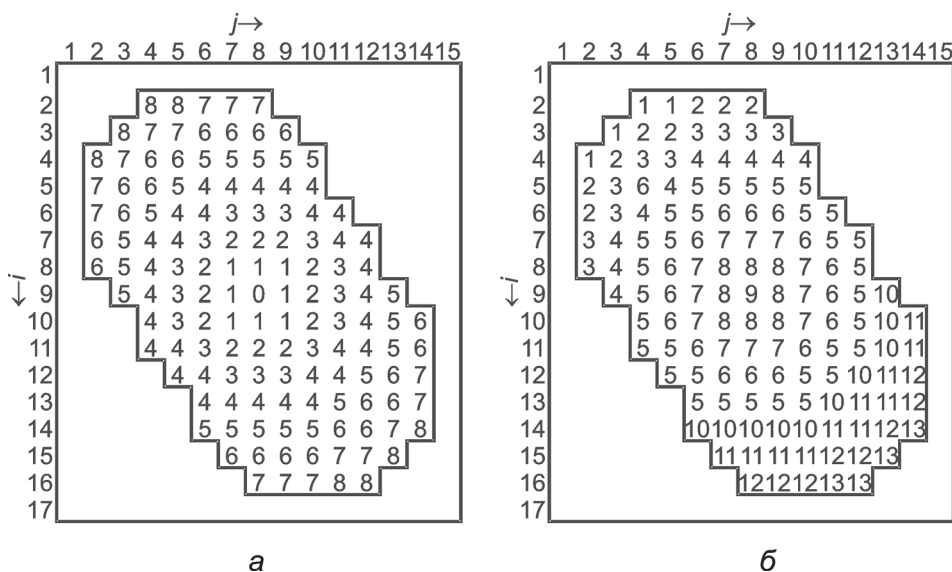


Рис. 2. Диаграммы характеристических расстояний (а) и отсчётных сегментов (б) пикселей следа вибрационного размытия изображения круглой метки

$= O_x) \cap ((i_c(m) \geq O_y)$; количество пикселей сегмента максимально при выполнении первых двух условий и характеристическое расстояние сегмента при этом также максимально.

В рассматриваемом примере таким сегментом является отсчётный сегмент, для которого $m = 11$. В качестве точки B примем точку с координатами: $B_x = 11,18 \text{ run}$; $B_y = 13,36 \text{ run}$ (см. таблицу) и с учётом (9) запишем:

$$\varphi = \arctg \frac{B_y - O_y}{B_x - O_x} = \arctg \frac{13,36 \text{ run} - 9 \text{ run}}{11,18 \text{ run} - 8 \text{ run}} = 0,9406 \text{ рад.}$$

Параметр L_{xy} рассчитаем по (3):

$$L_{xy} = l_{xy} - l_z = 8 \text{ run} - 4 \text{ run} = 4 \text{ run.}$$

Параметры L_x , L_y вычислим по (5), (6), соответственно:

$$L_x = L_{xy} \cos \varphi = 4 \text{ run} \cdot \cos 0,9406 = 2,357 \text{ run};$$

$$L_y = L_{xy} \sin \varphi = 4 \text{ run} \cdot \sin 0,9406 = 3,2316 \text{ run.}$$

Далее с учётом параметров, определённых при калибровке системы, по (4) найдём L_z . По формулам (2), (7), (8) вычислим компоненты вектора амплитуды вибрационного перемещения исследуемой точки A_z , A_x , A_y , соответственно. Эти компоненты выражены не в растровых единицах, а в микрометрах. На основе данных компонентов вычислим модуль вектора:

$$[A] = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}.$$

Предложенный способ позволяет измерять не только амплитуду, но и направление вибрационных перемещений исследуемой точки без физического контакта элемента поверхности с инерционной массой датчика, что позволяет проводить измерения динамических характеристик исследуемого объекта, обусловленных лишь его собственными параметрами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения».

Л и т е р а т у р а

1. Yurkov N. K., Gorbalysov M. S., Yakimov A. N. The improving of the Radar Detection System under the Influence of External Actions // Modern problems of radioengineering, telecommunications, and computer science. Proc. Intern. Conf. TCSET. 2012. P. 186—187.
2. Shishulin D. N., Yurkov N. K., Yakimov A. N. Research of the Vibration Effects on the Mirror Antenna's Radiation Using

ANSYS // Modern problems of radioengineering, telecommunications, and computer science. Proc. Intern. Conf. TCSET. 2014. P. 135.

3. Шишулин Д. Н., Юрков Н. К., Якимов А. Н. Моделирование излучения зеркальной антенны с учетом вибрационных воздействий // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 54—56.

4. Ширшов М. В., Юрков Н. К., Якимов А. Н. Оценка погрешности построения геометрической модели зеркала антенны по методу Делоне // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 49—51.

5. Максимов Е. Ю., Юрков Н. К., Якимов А. Н. Конечно-элементная модель тепловых воздействий на микрополосковую антенну Измерительная техника. 2011. № 2. С. 65—67.

6. Голушко Д. А., Затылкин А. В., Юрков Н. К. Методика исследования динамических характеристик технических систем на основе рассогласования фаз внешнего вибрационного воздействия // Надёжность и качество сложных систем. 2014. № 4. С. 88—92.

7. Лысенко А. В., Таньков Г. В., Шаркунова Т. А. Алгоритм формирования сигналов обратной связи для информационной системы управления активной виброзащитой РЭУ // Надёжность и качество сложных систем. 2014. № 3. С. 50—56.

8. Пат. 2535237 RU Способ измерения вибраций / А. Л. Држевецкий, Н. К. Юрков, А. В. Григорьев, А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров, С. В. Кузнецов, Ю. А. Држевецкий, В. А. Деркач // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 34.

9. Григорьев А. В., Данилова Е. А., Бростилов С. А., Наумова И. Ю., Лапшин Э. В., Баранов А. А. Структура методики измерения параметров вибраций по следу вибрационного размытия изображения круглой метки // Надёжность и качество: Труды Международного симпозиума. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, Т.2. С. 13—16.

10. Grigor'ev A. V., Goryachev N. V., Yurkov N. K. Way of measurement of parameters of vibration of mirror antennas // SIBCON: Proc. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications 2015. Omsk: Omsk State Technical University. Russia (Omsk). DOI:10.1109/SIBCON.2015.7147031.

11. Григорьев А. В., Алмаметов В. Б., Долотин А. И., Царев А. Г., Беликов Г. Г., Гришко А. К. Методика калибровки системы трёхкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Надёжность и качество: Труды Международного симпозиума. Пенза, Пензенский государственный университет. Т.2. С. 16—19.

12. Пат. 2032218. РФ. Устройство для селекции изображений объектов / А. Л. Држевецкий, В. Н. Контисhev, А. В. Григорьев, А. Г. Царёв // Изобретения. 1995. № 24.

13. А.с. 1383413 СССР. Устройство для подсчёта количества изображений объектов / А. Л. Држевецкий, Р. А. Абульханов, С. Т. Баканов, А. Б. Левин, В. В. Молдованов // Открытия. Изобретения. 1988 № 11.

Дата принятия: 16.03.2016.