

УДК 535.15

Имитационное моделирование сигнатуры теплового объекта

© 2018 г. **Б. В. Скворцов, доктор техн. наук; А. С. Перцович, аспирант;**
Д. М. Живоносновская, аспирант

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Самарский университет), Самара
E-mail: aps@ssau.ru

Поступила в редакцию 23.11.2017

В статье приведено математическое обоснование процедуры формирования импульса пуска движущегося теплового объекта, описываемого сигнатурой, являющейся трёхмерной функцией параметров излучения — формы, частоты и яркости. Разработана методика расчёта формы импульса, спектральных характеристик многокомпонентных источников света, имеющих несколько экстремумов, и суммарной диаграммы направленности имитатора. Проведён краткий анализ сигнатуры, как амплитудно-модулированного оптического сигнала.

Ключевые слова: сигнатура, оптико-электронные системы, синтез, диаграмма направленности, форма импульса, спектральная характеристика, имитатор, тепловой объект.

Коды OCIS: 080.0080, 120.4820.

Создание бортовых комплексов обороны (БКО) требует разработки оборудования для обеспечения испытаний их оптико-электронных систем пеленгации [1–3].

Каждый тепловой объект обладает своей сигнатурой (средневековое лат. *signatura* — знак, от лат. *signo* — указываю, обозначаю), под которой понимается набор параметров излучения, таких как яркость и спектральный состав, а также закон их изменения в заданном интервале времени, соответствующем процессу пеленгации объекта. Сигнатура изменяется под действием внешних факторов, таких как тепловой баланс, источники тепла, аэродинамический нагрев (для воздушных объектов), конвекция и излучение. Несмотря на то, что физические процессы горения факелов ракет и других известных летательных объектов хорошо изучены, в России и за рубежом недостаточно исследованы вопросы создания устройств, способных имитировать сигналы, формируемые при их пуске.

В общем случае сигнал имитатора описывается яркостью излучения в определенном направлении, и имеет закон изменения во времени и спектральный состав, типичный вид которых показан на рис. 1. Данные характеристики получены путём усреднения электромагнитных сигналов ракет (Игла, Стрела, Стингер), снятых экспери-

ментальным путём и обработанных специальными программами. Сигналы соответствуют имитируемому тепловому объекту в момент пуска, либо какой-то стадии его движения [4].

В качестве имитатора теплового объекта используется устройство, описанное в работах [5, 6]. Данный имитатор является источником оптического сигнала, обладает заданной диаграммой направленности, излучает электромагнитный импульс определённой формы и ограниченной длительности, содержит требуемый набор частот оптического диапазона.

Исходными данными для синтеза сигнатуры теплового объекта является форма и спектральный состав электромагнитного сигнала. Нормированная (отнесённая к максимальному значению) яркость синтезируемого сигнала в направлении, определённом диаграммой направленности может быть описана функцией

$$E(t, \omega, \theta) = A(t)S(\omega)B(\theta), \quad (1)$$

где $A(t)$ определяет форму синтезируемого импульса во времени (безразмерная функция, изменяющаяся в интервале $0 < A(t) < 1$). $S(\omega)$ определяет спектральный состав излучаемого сигнала, который описывает изменение нормированной яркости источника от частоты $0 < S(\omega) < 1$.

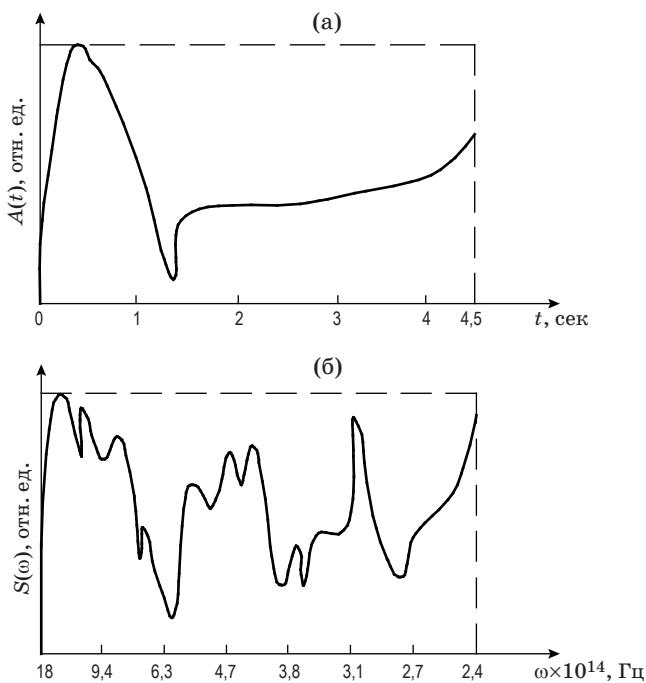


Рис. 1. Изменение во времени (а) и спектральный состав (б) сигнала имитатора.

Функции $A(t)$, $S(\omega)$ определены в диапазонах: t — время существования объекта имитации, например, время полёта ракеты с момента пуска или обнаружения, $0 < t < t_{\max}$;

ω — частоты оптического диапазона волн, излучаемые тепловым объектом за время существования, $\omega_{\min} < \omega < \omega_{\max}$;

θ — пространственный угол, определяющий отклонение выбранного направления от направления максимального излучения имитатора, $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$.

$B(\theta)$ — нормированная диаграмма направленности имитатора, безразмерная функция, $0 < B(\theta) < 1$. При $\theta = 0$ направление максимального излучения $B(0) = 1$.

Для математического моделирования целесообразно использовать нормированные значения указанных величин, $0 \leq E(t, \omega, \theta) \leq 1$. В общем случае имитатор реализуется в виде набора N излучателей (светодиодов), размещённых на некоторой плоскости на известном расстоянии друг от друга. Причём, каждый k -ый излучатель в общем случае имеет собственную диаграмму направленности и спектральный состав (рис. 2).

Примем следующие допущения:

1. Расстояние между произвольной парой излучателей d_{kN} много меньше расстояния до приёмника имитируемого сигнала.

2. Диаграмма направленности каждого k -го излучателя симметрична относительно направления максимального излучения B_{0k} .

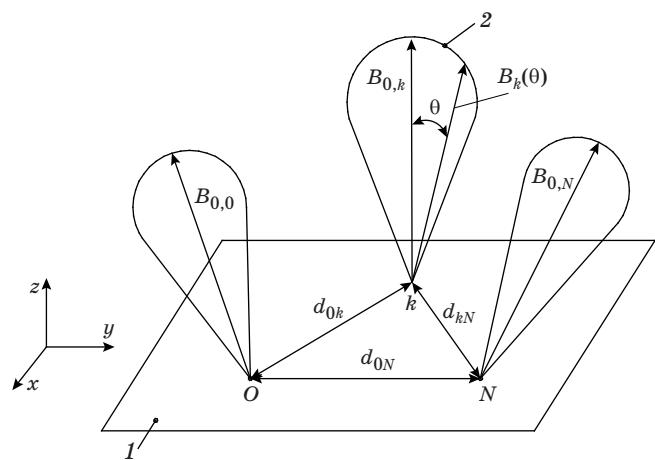


Рис. 2. Иллюстрация к постановке задачи. $0, k, N$ — точечные излучатели (светодиоды), 1 — поверхность расположения излучателей, 2 — диаграмма направленности k -го излучателя, B_{0k} — направление максимального излучения k -го излучателя, θ — угол отклонения от направления максимального излучения.

3. При описании физических процессов ограничимся применением законов геометрической оптики.

4. Оптические характеристики излучателей взаимно независимы.

5. Диаграмма направленности не зависит от частоты излучения и напряжения питания.

Допущения вполне очевидны, так как расстояния между излучателем и приёмником сигналов составляет от сотен метров до полутора километров, что много больше размеров имитатора и тем более длины волны излучения.

При указанных допущениях формула (1) примет вид

$$E(t, \omega, \theta) = A(t) \sum_{k=0}^N \sum_{i=0}^N S_k(\omega) B_i(\theta) = \\ = A(t) \sum_{k=0}^N S_k(\omega) \sum_{i=0}^N B_i(\theta), \quad (2)$$

в которой все члены $S_k(\omega) B_i(\theta) = 0$, при $k \neq i$.

При этом

$$G(t, \omega) = A(t) \sum_{k=0}^N S_k(\omega), \quad (3)$$

где $G(t, \omega)$ — сигнатура имитируемого объекта,

$$B(\theta) = \sum_{i=0}^N B_i(\theta), \quad (4)$$

$B(\theta)$ — суммарная диаграмма направленности имитатора.

Для излучателей с одинаковыми характеристиками

$$E(t, \omega, \theta) = A(t) \sum_{k=0}^N S_k(\omega) \sum_{k=0}^N B_k(\theta) = G(t, \omega) B(\theta).$$

Таким образом, разработка имитатора тепловых объектов заключается в том, что необходимо подобрать и разместить комплектующие излучатели таким образом, чтобы он соответствовал следующим требованиям:

- обеспечивал заданную суммарную диаграмму направленности $B(0)$;
- в каждом из направлений диаграммы направленности θ_i в произвольный момент времени t_i имел необходимый спектральный состав излучения;
- в каждом из направлений диаграммы направленности θ_i для каждой спектральной составляющей ω_i излучаемого сигнала имел заданный закон изменения во времени $A(t)$.

Изучение типичного вида диаграммы направленности показало, что основой для такой модели может служить лемниската Бернулли [7], которая в полярной системе координат описывается формулой

$$\rho^2 = 2c^2 \cos(2\phi). \quad (5)$$

Эта функция, повёрнутая на 90° и ограниченная диапазоном углов $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$, вполне адекватно описывает форму диаграммы направленности излучателя с вертикальным направлением максимального излучения. При этом интенсивность максимального излучения определяется коэффициентом c . Однако диаграмма направленности реального излучателя (светодиода) может иметь различную ширину, интенсивность и угол наклона. Для этого в формулу (6) введены дополнительные коэффициенты, каждый из которых позволяет изменять указанные параметры излучения. Исследования показали, что в общем случае диаграмма направленности может быть описана следующей функцией:

$$B(\phi) = \rho^2 = c^2 \cos(g\phi - \frac{\pi}{2} + b)^q, \quad (6)$$

где b определяет угол наклона линии максимального излучения, $-\pi/4 \leq b \leq \pi/4$, g , q определяют ширину диаграммы направленности.

Изменение коэффициентов g и q ведёт к расширению и сужению диаграммы. Коэффициент g применим только для «расширения» функции и не может превышать значений от 0,9 до 2, так как это приводит к возникновению дополнительных максимумов в рассмотренном диапазоне углов. Коэффициент q позволяет «сузить» диаграмму направленности, но не может принимать значения, равные целочисленным чётным числам.

Аналитическое описание (6) позволяет проводить расчёт суммарной диаграммы направленности N источников излучения, каждый k -ый из ко-

торых имеет собственную диаграмму направленности, описываемую функцией

$$B_k(\phi) = \rho_k^2 = c_k^2 \cos(g_k\phi - \frac{\pi}{2} + b_k)^{q_k}, \quad (7)$$

$$k = 0, \dots, N, -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2.$$

Учитывая, что расстояния между излучателями много меньше расстояния до приёмника, можно условно принять, что все излучатели находятся в одной точке. Тогда суммарную диаграмму направленности можно определить по формуле

$$B(\phi) = \sum_{k=0}^N B_k(\phi) = \sum_{k=0}^N c_k^2 \cos\left(g_k\phi - \frac{\pi}{2} + b_k\right)^{q_k}. \quad (8)$$

В среде MathCAD разработана программа, позволяющая получать суммарную диаграмму направленности от нескольких источников излучения (рис. 3). Пример показывает эффективность предложенной методики расчёта диаграммы направленности сложных излучающих систем. Выражение (3) определяет сигнатуру сигнала, которую можно изобразить в виде трёхмерной функции, показанной на рис. 4.

Для расчёта, анализа и моделирования имитатора, состоящего из совокупности различных источников излучения, необходимо аналитическое



Рис. 3. Пример расчёта суммарной нормированной диаграммы направленности имитатора, состоящего из семи излучателей.

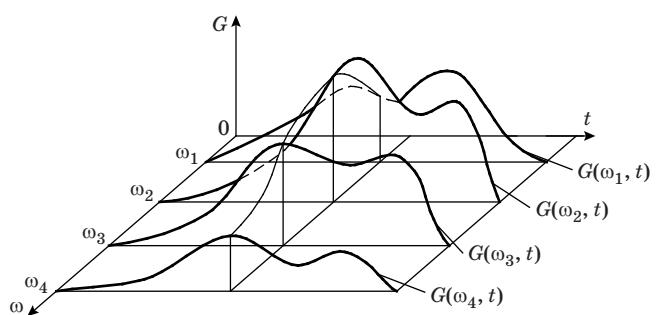


Рис. 4. Графическое изображение сигнатуры имитирующего сигнала.

описание спектральной характеристики. Сначала рассмотрим возможности аналитического описания спектральной характеристики отдельно взятого излучателя. Изучение типичного вида нормированной спектральной характеристики светодиодов показало, что основой для такой модели может служить функция

$$S(\omega) = \frac{D\omega}{(\omega - \omega_0)^2 b + \omega_0}, \quad (9)$$

где D определяет максимальное значение спектральной характеристики, b определяет ширину спектральной характеристики, ω_0 — частота экстремума.

Изменение коэффициента b позволяет изменять ширину спектральной характеристики. При этом увеличение b приводит к сужению спектра. В общем случае, при произвольных b положение и значение экстремума функции (9) определяется по формулам

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{\omega_0}{b}},$$

$$S_{\max} = S(\omega_r) = \frac{D\omega_r}{(\omega_r - \omega_0)^2 b + \omega_0}. \quad (10)$$

Отсюда видно, что при $b\omega_0 \gg 1$, $\omega_r \approx \omega_0$, $S_{\max} = S(\omega_r) \approx S(\omega_0) \approx D$. Соотношение $b\omega_0 \gg 1$ определяет границы применимости формулы (9) при аналитическом описании спектральных характеристик светодиодов. Отметим, что указанное условие легко выполнимо, так как $\omega_0 \gg 1$. Различные комбинации значений коэффициентов D , b , ω_0 позволяют создать функцию, описывающую спектральную характеристику источника излучения с различными значениями амплитуды, частоты резонанса и ширины спектрального состава.

Выберем контрольные точки, по которым будет проводиться приближенное аналитическое описание спектральной характеристики, и найдем погрешности приближения для каждой точки (та-

блица). Здесь ε_{Π} — относительная приведённая погрешность, определяемая по формуле

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{S(\omega) - S^*(\omega)}{S_{\max}(\omega)} = \frac{\Delta}{S_{\max}(\omega)}. \quad (11)$$

Таким образом, по сравнению с полиномиальной аппроксимацией погрешность приближения спектральной характеристики с помощью функции (9) вполне приемлема даже при минимальном количестве контрольных точек.

Аналитическое описание (9) позволяет проводить расчёт суммарной спектральной характеристики N источников излучения, каждый k -ый из которых имеет собственную спектральную характеристику, описываемую функцией

$$S_k(\omega) = \frac{D_k \omega}{(\omega - \omega_{0k})^2 b_k + \omega_{0k}}, \quad k = 0, \dots, N. \quad (12)$$

Суммарная спектральная характеристика определяется по формуле

$$S(\omega) = \sum_{k=0}^N S_k(\omega) = \sum_{k=0}^N \frac{D_k \omega}{(\omega - \omega_{0k})^2 b_k + \omega_{0k}}. \quad (13)$$

В среде MathCAD разработана программа, позволяющая получать суммарную спектральную характеристику от нескольких источников излучения. Отметим, что в дальнейшем суммарную диаграмму направленности нужно нормировать, то есть делить на максимальное значение, которое также определяется при суммировании. На рис. 5 приведён пример расчёта суммарной нормированной спектральной характеристики, состоящей из семи источников излучения. По заданному уровню, например, $0,95 S_{\max}$, можно выделить интервал существенных частот в спектральной характеристике каждого отдельного излучателя или имитатора в целом $\Delta\omega_c = \omega_{c2} - \omega_{c1}$. Отметим, что в сложном излучателе частота максимального излучения ω_0 не всегда находится в середине существующего диапазона частот.

Погрешности приближения спектра светодиода UVTOP280TO39BL функцией (9) по семи точкам отсчёта

№	0	1	2	3	4	5	6
λ	250	274,5	280	284,5	288	297,5	310
ω	$9,671 \times 10^{14}$	$1,008 \times 10^{15}$	$1,041 \times 10^{15}$	$1,054 \times 10^{15}$	$1,071 \times 10^{15}$	$1,092 \times 10^{15}$	$1,199 \times 10^{15}$
$S(\omega)$	0,02	0,1	0,6	1	0,6	0,1	0,02
$S^*(\omega)$	0,034	0,113	0,595	0,996	0,546	0,185	0,016
Δ	0,014	0,013	$5,282 \times 10^{-3}$	$4,296 \times 10^{-3}$	0,054	0,085	0,004
ε_{Π} , %	1,397	1,335	0,528	0,43	5,449	8,47	0,4

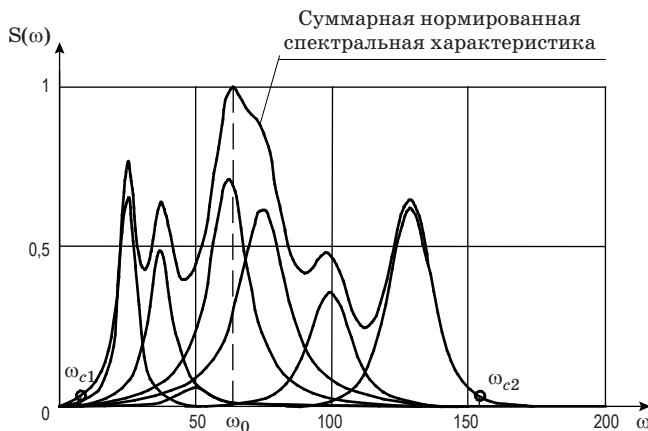


Рис. 5. Пример расчёта суммарной нормированной спектральной характеристики излучателя, состоящей из семи источников.

Предложенная методика позволяет аналитически описывать достаточно сложные спектральные характеристики источников света, имеющих несколько экстремумов, и значительно облегчает исследование многокомпонентных излучающих систем.

Сигнатура объекта реализуется всеми излучателями одновременно путём подачи на них импульса питающего тока заданной формы $A(t)$. Задача формирования питающего импульса заданной формы хорошо известна и реализуется методами, изложенными в работах [8]. Известны способы построения подобных генераторов, в одном из которых сложное колебание получается в результате суммирования определённого числа элементарных сигналов с изменяемыми параметрами, а в другом — суммированием импульсов напряжения прямоугольной формы [9]. Недостатком таких подходов является невозможность настройки формы переднего и заднего фронтов выходного импульса независимо друг от друга. Развитие микропроцессорной техники позволяет осуществить прямой цифровой синтез сигналов DDS (Direct Digital Synthesizers) путем опроса памяти, хранящей оцифрованные отсчёты сигнала заданной формы, с преобразованием их в аналоговую форму с помощью высокоскоростных цифроаналоговых преобразователей. Генерация сигналов основана на использовании заранее подготовленных и хранящихся в памяти оцифрованных N выборок сигнала за его один период. Недостаток данного метода синтеза состоит в том, что он имеет затруднения при реализации импульсов, имеющих несколько экстремумов.

Другой возможностью описания сложного импульса является аппроксимация его аналитической функцией заданного вида с подбираемыми коэффициентами. При этом используется типичный вид синтезируемого импульса, например, сигнал, излучаемый движущимся объектом на старте

и начальном этапе движения. Проанализируем более подробно характеристики импульса, показанного на рис. 1а. Нормированный вид этого сигнала с выделением характерных точек показан на рис. 6. Спектральный состав сигнала определяется преобразованием Фурье от импульса $A(t)$ и является комплексной величиной

$$s(j\Omega) = F[A(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) e^{-j\Omega t} dt = \\ = \operatorname{Re}(\Omega) + j \operatorname{Im}(\Omega) = s(\Omega) e^{j\phi(\Omega)}. \quad (14)$$

Для определения спектрального состава пускового импульса желательно знать аналитическое описание формы импульса $A(t)$, которое можно выполнить по следующей методике.

Весь сигнал можно разделить на три характеристических участка, соответствующих реальным физическим процессам, происходящим, например, при пуске ракеты. В период времени $0-t_C$ зажигается и горит стартовый двигатель, который отрывает ракету от пусковой установки. В момент времени t_C электромагнитный сигнал достигает максимального значения C . В период t_C-t_D стартовый двигатель гаснет, идёт подготовка к запуску маршевого двигателя. В момент времени t_D сигнал становится минимальным, равным D , что связано с остыанием стартового двигателя. Период времени t_D-t_E соответствует выбросу энергии в момент запуска маршевого двигателя. Электромагнитный сигнал ракеты практически скачкообразно увеличивается до значения E . Период t_E-t_G соответствует прогреву маршевого двигателя и выходу его на стационарный режим работы, при котором ракета летит к цели.

Как правило, перед пеленгационной системой ставится задача обнаружения движущегося объекта в период времени $0-t_G$, поэтому сигнал имитатора, используемый для испытаний и отладки пеленгационной системы, ограничивается време-

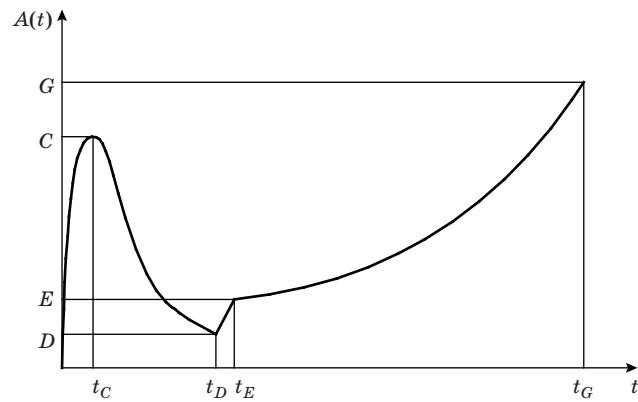


Рис. 6. Электромагнитный импульс, излучаемый тепловым объектом при пуске.

нем t_G . Конкретные значения контрольных точек сигнала ($C, D, E, G, t_C, t_D, t_E, t_G$) зависят от типа движущегося объекта, состояния атмосферы, положения солнца, расстояния от имитатора до приёмника. Имитатор должен быть перестраиваемым по указанным точкам сигнала. Реальные значения времени — $2 \leq t_G \leq 5$ с.

Исследования показали, что такой сигнал может быть смоделирован функцией

$$A(t) = at^b e^{ct}, \text{ при } 0 \leq t \leq t_D, \quad (15)$$

$$A(t) = d[1 - e^{p(t_D - t)}] + D, \text{ при } t_D \leq t \leq t_E, \quad (16)$$

$$A(t) = g(t - t_E)^2 + E, \text{ при } t_E \leq t \leq t_G. \quad (17)$$

Здесь коэффициенты a, b, c, d, g, p определяются по характерным точкам t_C, t_D, t_E, t_G из условия стыковки функций на границе и обеспечения численных значений C, D, E, G . Анализ экстремума (выражение 15) и условия стыковки в точке t_D (выражение 15, 16) позволяют получить следующие уравнения для определения вышеуказанных коэффициентов:

$$t_C = -\frac{b}{c}, \quad C = at_C^b e^{ct_C}, \quad D = at_D^b e^{ct_D}. \quad (18)$$

После подстановки $b = -ct_C$, получим $C = at_C^{-ct_C} e^{ct_C}$, $D = at_D^{-ct_D} e^{ct_D}$.

Деление двух последних выражений даёт следующее уравнение для определения коэффициента c :

$$C t_D^{-ct_C} e^{ct_D} = D t_C^{-ct_C} e^{ct_C},$$

$$\begin{aligned} \ln C - ct_C \ln t_D + ct_D &= \ln D - ct_C \ln t_C + ct_C, \\ c &= \ln \left(\frac{C}{D} \right) \frac{1}{t_C \left(1 + \ln \frac{t_D}{t_C} \right) - t_D} = \\ &= \frac{\ln C - \ln D}{t_C (1 + \ln t_D - \ln t_C) - t_D}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} b &= \ln \left(\frac{C}{D} \right) \frac{-t_C}{t_C \left(1 + \ln \frac{t_D}{t_C} \right) - t_D} = \\ &= -\frac{(\ln C - \ln D)t_C}{t_C (1 + \ln t_D - \ln t_C) - t_D}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= C t_C^{-b} e^{-ct_C} = \\ &= C \left(\frac{e}{t_C} \right)^b = C \left(\frac{e}{t_C} \right)^{-t_C} \ln \left(\frac{C}{D} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (20)$$

Из условия стыковки соотношений (16), (17) в точке t_E получаем выражения для определения других коэффициентов

$$E = d[1 - e^{p(t_D - t_E)}] + D. \quad (21)$$

Здесь два неизвестных параметра d и p . Для их определения воспользуемся следующими соображениями. Как видно из рис. 6, в момент времени $t = t_E$ вспышка, связанная с включением маршевого двигателя, должна практически затухнуть. В большинстве физических явлений переходный процесс считается завершённым, если переменный сигнал входит в полосу $\pm 5\%$ от установившегося значения [10]. В нашем случае окончания переходного процесса определится выражением

$$\begin{aligned} 1 - e^{p(t_D - t_E)} &= 0,95, \text{ отсюда} \\ p &= \frac{\ln 0,05}{t_D - t_E} = -\frac{2,996}{t_D - t_E} = \frac{2,996}{t_E - t_D}. \end{aligned} \quad (22)$$

Из (22) находим

$$d = \frac{E - D}{0,95} = 1,053(E - D). \quad (23)$$

Из (16) находим оставшийся коэффициент g с учётом, что при $t = t_G, A(t) = G$.

$$G = g(t_G - t_E)^2 + E, \text{ отсюда } g = \frac{G - E}{(t_G - t_E)^2}. \quad (24)$$

Выражения (19)–(24) по характерным точкам определяют коэффициенты в аналитических формулах (15)–(17), описывающих форму импульса, реализуемого в имитаторе тепловых объектов.

К сожалению, амплитудный спектр сигнала, описываемого системой выражений (15)–(17), не поддаётся прямому аналитическому описанию в виде того, что функция (15) не интегрируется в аналитическом виде. Однако приближённое описание вполне возможно. Анализ рис. 7 показывает, что если проигнорировать (сгладить) колебания спектра, вызванные скачком DE в импульсе пуска на участке частот от 0,5 до 10 Гц, то амплитудный спектр приближённо может быть описан функцией

$$s(\Omega) \approx s^*(\Omega) = \frac{s^2(0)}{s(0) + P\Omega^2}. \quad (25)$$

Приведённая погрешность аппроксимации для всех графиков не превышает 15%, что вполне достаточно для качественного анализа процесса.

Фактически сигнал имитатора представляет собой оптический сигнал, модулированный импульсом $A(t)$. При этом модуляции подвергается каждая из частот излучения, присутствующая в комплекте светодиодов. В этом случае для любой выбранной частоты излучения ω , присутствующей в оптическом спектре $S(\omega)$, импульс имитатора может быть описан в виде амплитудно-модулированного сигнала по формуле

$$G(t, \omega) = A(t)S(\omega)\cos[\omega t + \phi(\omega)], \quad (26)$$

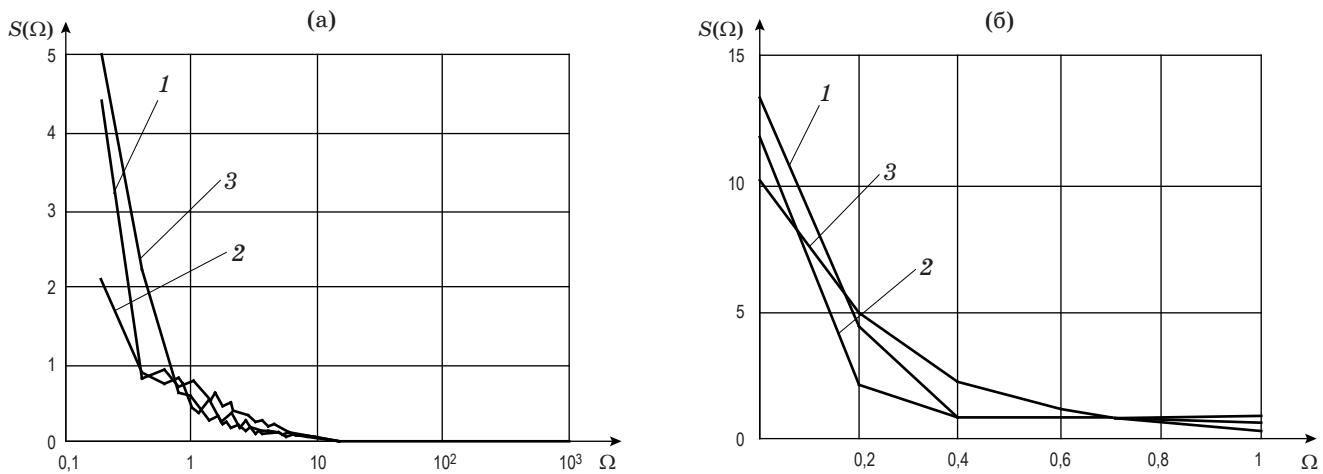


Рис. 7. Амплитудный спектр импульса при различных значениях его контрольных точек, в логарифмической шкале частот (а), и на начальном участке (б). 1 — $s_1(0) = 13,524$; 2 — $s_2(0) = 12,051$; 3 — $s_3(0) = 10,198$.

где $\phi(\omega)$ — фаза спектральной составляющей излучения, $S(\omega)$ — интенсивность излучения светодиода на частоте ω . При этом ω играет роль несущей частоты при модуляции, которая должна быть много больше максимальной (существенной) частоты спектра огибающего импульса Ω_c .

В общем случае в спектральной характеристики $S(\omega)$ можно взять M отсчётов в диапазоне существования $S(\omega)$ и просуммировать

$$s_G(\Omega) = 0,5 \sum_{i=1}^M S(\omega_i) s(\Omega - \omega_i). \quad (27)$$

Рассмотрим пример расчёта сигнатуры при моделировании спектрального состава излучателя по формуле (9) и спектра импульса по формуле (27).

После подстановок формула (27) примет вид

$$s_G(\Omega) = 0,5 D s^2(0) \times \times \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i}{[(\omega_i - \omega_0)^2 b + \omega_0] [P(\Omega - \omega_i)^2 + s(0)]}. \quad (28)$$

Результирующий амплитудный спектр $s_G(\Omega)$ формируется как огибающая по спектрам отдельных отсчётов $s_{Gi}(\Omega)$. Учитывая стандартный вид полученного импульса, его также можно аппроксимировать функцией вида (9)

$$s_G(\Omega) = \frac{D_{\Omega} \Omega}{(\Omega - \Omega_0)^2 b_{\Omega} + \Omega_0}. \quad (29)$$

Если функции $S(\omega)$ и $s(\Omega)$ заданы в табличном виде, то вычисление $s_G(\Omega)$ возможно в численной форме по формуле (27). Если имитатор состоит из нескольких источников излучения с известными спектральными характеристиками $S_k(\omega)$,

то спектр общего сигнала имитатора определится по формуле

$$s_G(\Omega) = \sum_{k=1}^N s_{Gk}(\Omega) = 0,5 \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M S_k(\omega_i) s(\Omega - \omega_i), \quad (30)$$

либо по аппроксимирующими формулам

$$s_G(\Omega) = \sum_{k=0}^N s_{Gk}(\Omega) = \sum_{k=0}^N \frac{D_{\Omega k} \Omega}{(\Omega - \Omega_{0k})^2 b_{\Omega k} + \Omega_{0k}} = \sum_{k=0}^N \sum_{i=0}^M \frac{D_k \omega_i d\omega}{[(\omega_i - \omega_{0k})^2 b_k + \omega_{0k}] [P(\omega_i - \Omega)^2 + s(0)]}. \quad (31)$$

Приведён пример расчёта амплитудного спектра сигнала имитатора, содержащего семь светодиодов с суммарной спектральной нормированной характеристикой, модулированной сигналом, показанным на рис. 7 (кривая 3). Результаты расчётов совпадают по форме с рис. 5, но отличаются в количественных значениях. Разработанная методика позволяет рассчитать полный частотный спектр сигнала имитатора, состоящего из нескольки-

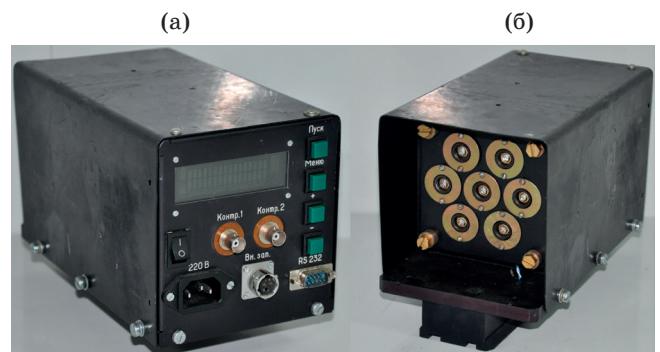


Рис. 8. Имитатор тепловых объектов.

ких источников излучения, модулированных сложным сигналом пуска ракеты. На основании приведённых теоретических исследований был разработан экспериментальный образец имитатора тепловых объектов, содержащий семь источников излучения (рис. 8).

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель источника излучения, состоящего из набора N излучателей (светодиодов), генерирующих в заданном направлении электромагнитный сигнал требуемого спектрального состава, модулированный сигналом заданной формы. Данна методика расчёта суммарной диаграммы направленности имитатора, основанная на моделировании диаграммы каждого отдельного излучателя лемнискатой Бернулли с введением коэффициентов, определяющих её ширину, интенсивность и угол наклона. Разработана методика расчёта спектральных характеристик многокомпонентных источников света,

имеющих несколько экстремумов, основанная на аналитическом описании спектров комплектующих излучателей. Предложено математическое описание и разработана методика расчёта формы импульса и спектрального состава имитатора, основанные на аналитическом описании реально-го импульса пуска теплового объекта с помощью функций заданного вида. Получена эффективная длительность и полоса существенных частот в спектре пускового импульса. Проведён анализ сигнатуры, как амплитудно-модулированного оптического сигнала. Определён в общем виде спектральный состав оптического излучателя, модулированного импульсом питания произвольной формы. Приведены примеры расчётов, которые показали корректность разработанной теории.

Работа выполнена в Самарском университете при поддержке Минобрнауки России. В статью включены результаты, полученные в рамках реализации государственного задания (номер проекта 8.2297.2017/4.6)

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В.П. Эффективность комплексирования разноканальных изображений при опознавании объектов // Оптический журнал. 1992. № 2. С. 20.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // Специальная техника. 2002. № 4. С. 56–62.
3. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: МГТУ, 2001. 352 с.
4. Тиранов А.Д., Филиппов В.Л. Модельный расчет спектральной плотности силы излучения факелов ракетных двигателей на твердом топливе // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 3. С. 77–83.
5. Перцович А.С., Бутузов В.В., Скворцов Б.В., Носиков В.А., Ершова Т.А. Имитатор тепловых объектов // Патент России № 150881. 2015.
6. Перцович А.С., Скворцов Б.В. Имитатор тепловых источников излучения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6. С. 76–78.
7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1973. 872 с.
8. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК Пресс, 2009. 384 с.
9. Собакин Е.Л. Синтез генератора импульсов изменяемой формы // Известия Томского ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени С.М. Кирова. 1974. Т. 208. С. 51–60.
10. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.