

Библиографический список

1. Кей С.М., Марш С.Л. .Современные методы спектрального оценивания //ТМИЭР. 1981. Т. 69. № II. С. 5-51.
2. Наккас Х.Л., Рагувер М.Р. Виспектральное оценивание применительно к цифровой обработке сигналов //ТМИЭР. 1987. Т. 75. № 7. С. 5-31.
3. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ негауссовых случайных процессов и их преобразований. М.: Сов. радио, 1987.
4. Аратский Д.Б., Солдатов Е.А., Фидельман В.Р. О байесовском подходе к вычислению спектров случайных процессов и полей. - Деп. в ВНИТИ от 22.10. 87, рег. № 7430-В87.
5. Джэйнс Э.Т. О логическом обосновании методов максимальной энтропии //ТМИЭР. 1982. Т. 70. № 9. С. 33-51.
6. Базара М., Шеттл К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы. М.: Мир, 1982. 580 с.
- 7, Аратский Д.Б., Будников Н.С., Солдатов Е.А., Фидельман В.Р. О многомерном спектральном анализе случайных сигналов методом Байеса. - Деп. в ВНИТИ от 01.04.88, рег. № 2514-В88.
8. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1975. 63 с.

УДК 533.9.082:621.3.012.6

Л.А.Бахвалов, Н.И.Федулец

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ФОРМОЙ ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
НА СО₂ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

(г. Москва)

Возможность управления формой импульса излучения в лазерной системе импульсно-периодического действия является, по-видимому, значительным достоинством в системах связи для осуществления модуляции интенсивности излучения - в технологических задачах, для изменения режима обработки изделий - в исследованиях взаимодействия излучения с веществом. При этом важно, чтобы способ управления был малоинерционным и позволял иметь как можно больший диапазон длительностей и амплитуд импульсов излучения на выходе лазерной системы.

Указанным требованиям отвечает исследованный в работах /1-3/ способ управления формой и длительностью импульса излучения усиленной системы на CO_2 , основанный на различии времен выделения энергии с колебательных состояний CO_2 и N_2 . Экспериментально доказано, что длительность выходного сигнала может плавно изменяться в пределах 0,06...2,0 мкс, максимальная мощность излучения в первом пике импульса 2 мВт ...30 мВт, при практически неизменной эффективности усилителя 10%. Технически управление формой импульса заключается в изменении времени задержки t_3 между началом возбуждения усилителя и моментом ввода излучения задающего генератора в пределах 0,05...1,5 мкс.

При достаточно сложном законе изменения во времени максимальной выходной мощности излучения в системе управления целесообразно применение ЭВМ. Рассмотрим подробнее организацию и возможность измерительно-управляющего комплекса аппаратуры. Необходимыми частями его являются детектор излучения, широкополосный усилитель, масштабно-временной (МВП) и аналого-цифровой преобразователи, ЭВМ, программно-управляемый генератор задержанных импульсов и средства защиты от электромагнитных помех. Детекторы излучения и широкополосные усилители, упоминавшиеся в работе /2/, вполне могут быть применены в данном случае. В качестве МВП целесообразно применить быстросрабатывающую измерительную систему, описанную в работе /3/.

Как указывалось выше, минимальная длительность импульса лазерной системы составляла 60 нс. Следовательно, для достаточного воспроизведения фронта импульса минимальное время дискретизации в измерительной системе должно составлять не более 0,3 нс. Аналого-цифровые преобразователи в настоящее время не обеспечивают таких характеристик, поэтому единственный выход в данном случае - применение МВП на основе запоминающей электронно-лучевой трубки с внутренним электрическим считыванием. Как показано в работе /3/, измерительная система, состоящая из МВП подобного типа и микро-ЭВМ, способна проводить циклы измерений с частотой повторения до 0,5 Гц, со скоростью записи не менее $5 \cdot 10^3$ км/с при числе элементов разложения кадра 256×256 .

При частотах повторения импульсов лазерной системы, составляющих единицы герц, характеристики измерительно-управляющего комплекса в значительной степени будут зависеть от скорости обработки данных в ЭВМ. Это обстоятельство и потребовало провести исследова-

ние, цель которого состояла в поиске такой упрощенной модели управления, которая позволила бы с помощью ЭВМ за относительно малое время и с удовлетворительной точностью вычислить время задержки τ_3 , обеспечивающее заданную форму импульсов. Исходным материалом для построения модели послужили восемь осциллограмм импульсов излучения, соответствующих различным временам τ_3 , полученным в работе /3/.

Построение упрощенной математической модели управления, описывающей зависимость f , интенсивности P лазерного излучения от времени t и времени задержки τ_3 , можно выполнить двумя способами: на основе теоретической модели импульсного усилителя на CO_2 , описанной в работе /1/, и на основе обработки экспериментальных осциллограмм импульсов излучения. Первый метод можно реализовать двумя путями: либо аналитической аппроксимацией решений математической модели, либо упрощением теоретической модели. Заметим, что такой подход довольно сложен, требует значительных усилий и затрат машинного времени. При втором подходе упрощенные математические модели имеют смысл интерполяционных уравнений и находятся на основе обработки эмпирических данных. Недостатки второго подхода очевидны – эмпирическая модель связывает лишь параметры, которые можно измерить в процессе эксперимента.

Простейшей эмпирической моделью является, по-видимому, модель, описывающая интенсивность излучения P как функцию времени t и время задержки τ_3 :

$$P(t, \tau_3), \quad (I)$$

В качестве экспериментальных данных для построения модели можно использовать осциллограммы изменения интенсивности излучения во времени, полученные при разных значениях времени задержки τ_3 . На рис. I показаны типичные осциллограммы импульсов излучения, полученные для разных τ_3 .

На каждой осциллограмме (при фиксированном времени задержки τ_3 есть участок запаздывания импульса излучения (на рис. I участок γ'). Для упрощения последующей обработки исходных данных сделаем допущение, что все импульсы интенсивности лазерного излучения берут начало в точке γ' . Нетрудно видеть, что при любых τ_3 график изменения интенсивности содержит два ярко выраженных участка – участок первого и второго максимумов излучения.

Простейшим способом построения эмпирического уравнения является нахождение степенного полинома от двух переменных t , τ_3 вида

$$P(t, \tau_3) = a_0 + a_1 t + a_2 \tau_3 + a_{12} t \tau_3 + a_{11} t^2 + a_{22} \tau_3^2 + \dots \quad (2)$$

Нахождение прогнозирующего уравнения по экспериментальным данным в этом случае заключается в подборе неизвестных коэффициентов a_0, a_1, \dots , минимизирующих сумму квадратов отклонений $\sum \Delta^2$. Анализ формы кривых импульсов лазерного излучения показывает, что для получения достаточно точной прогнозирующей модели необходима высокая степень полинома аппроксимации (седьмая-девятая степень от переменных t и τ_3).

Решение задачи можно упростить, если импульс представить в виде аддитивной суммы двух функций, одна из которых описывает кривую импульса излучения на начальном участке, вторая — кривую импульса излучения на втором участке. Анализ первого участка импульса позволяет отметить, что в первом приближении ширина импульса на этом участке не зависит от времени задержки. От времени задержки зависит амплитуда импульса, т.е. максимум интенсивности лазерного излучения. Для первого участка, построив зависимость максимума интенсивности излучения от времени задержки $P_{max}(\tau_3)$ (рис. 2), можно получить эмпирическую модель.

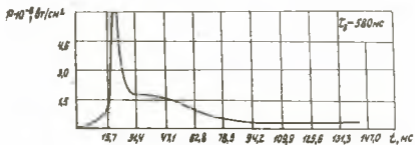
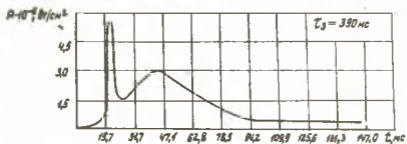
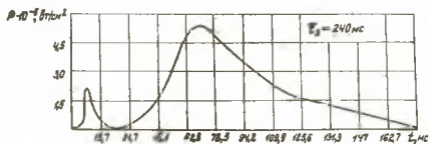
Зависимость максимума интенсивности излучения от времени задержки на первом участке со сравнительно высокой точностью аппроксимируется выражением

$$P_{max}(\tau_3) = \begin{cases} 1,5 \cdot 10^3 + 37,8 \tau_3^2 & \text{при } \tau_3 \geq 0 \\ 1,5 \cdot 10^3 & \text{при } \tau_3 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

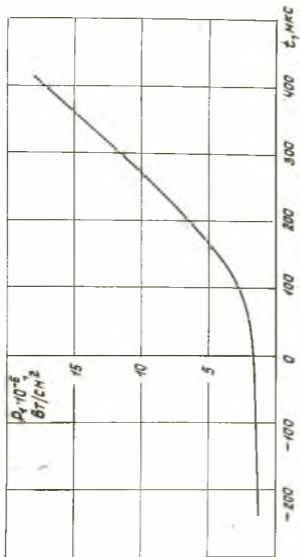
Для восстановления формы импульса лазерного излучения на первом участке воспользуемся функцией Лапласа

$$y(t) = e^{-\frac{(t-t')^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Чтобы пользоваться этой функцией, необходимо определить параметр σ . Применение правила "три-сигма" позволяет определить, что в нашем случае $\sigma = \frac{0,3}{T}$. Максимум $y(t)$, как это следует из осциллограмм, находится при $t' \cong 0,15$ мкс.



Р и с. I. Осциллограммы импульсов лазерного излучения от заданного значения времени задержки T_3



Р и с. 2. Зависимость интенсивности лазерного излучения от времени
задержки

Окончательно уравнение, восстанавливающее кривую импульса лазерного излучения на участке I, имеет вид

$$P_i(t, \tau) = P_{max}(\tau) e^{-(t-\tau)/2\tau} \quad (5)$$

Для второго участка кривой импульса излучения можно выбрать полиномиальную функцию от времени t и времени задержки τ_2 . Анализ зависимости интенсивности излучения от времени при фиксированных τ_2 (см. рис. I) позволяет высказать предположение, что аппроксимирующий полином может быть выбран четвертой-пятой степени. Полином пятой степени от двух переменных содержит 21 неизвестный коэффициент. Его можно упростить, исключая из него малосущественные члены /4/.

Для определения неизвестных коэффициентов полинома на основании имеющихся осциллограмм составим таблицу.

Таблица экспериментальных данных для построения полиномиального уравнения

τ_2	t	$P, \text{Вт/см}^2$	$\hat{P}, \text{Вт/см}^2$
-0,24	0,089	0,00	10,5
-0,24	0,445	22,80	27,8
-0,24	0,638	73,50	91,0
-0,24	0,821	151,0	206,0
-0,24	1,004	329,0	279,0
-0,24	1,461	189,0	203,0
-0,24	1,830	105,0	106,0
0,00	0,089	3,5	19,9
0,00	0,445	47,3	113,0
0,00	0,638	175,0	198,3
0,00	0,821	298,0	252,0
0,00	1,004	266,0	266,0
0,00	1,461	137,0	133,0
0,00	1,830	63,0	57,1
0,10	0,089	7,0	8,62
0,10	0,445	140,0	174,0

Окончание табл.

v_{σ}	t	$P, \text{Вт/см}^2$	$\hat{P}, \text{Вт/см}^2$
0,10	0,638	284,0	241,0
0,10	0,821	280,0	271,0
0,10	1,004	236,0	264,0
0,10	1,461	117,0	119,0
0,10	1,830	50,8	53,1
0,20	0,089	10,5	15,9
0,20	0,445	210,0	234,0
0,20	0,638	315,0	282,0
0,20	0,821	292,0	289,0
0,20	1,004	245,0	263,0
0,20	1,461	128,0	113,0
0,20	1,830	63,0	57,9
0,39	0,089	61,3	75,1
0,39	0,445	380,0	324,0
0,39	0,638	333,0	330,0
0,39	0,821	278,0	295,0
0,39	1,004	226,0	241,0
0,39	1,461	99,8	102,0
0,39	1,830	50,8	67,1
0,58	0,089	87,5	79,6
0,58	0,445	285,0	312,0
0,58	0,638	264,0	270,0
0,58	0,821	201,0	196,0
0,58	1,004	135,0	120,0
0,58	1,461	14,0	17,3
0,58	1,830	14,0	5,52

Полиномиальное уравнение, полученное по данным таблицы с помощью программы *EXPERIMENT*, описанной в работе [4], имеет вид

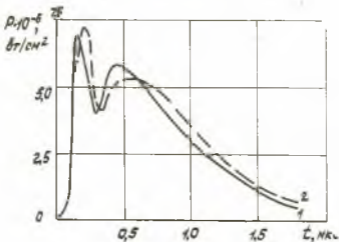
$$\begin{aligned}
 \mu_2(t, \tau_3) \equiv y(t, \tau_3) = & -28,088 - 417,23\tau_3 + \\
 & + 1113,4t^2 + 8031,8 \cdot t \cdot \tau_3 + 1070,2 \tau_3^2 - \\
 & - 914,45t^3 - 11567t^2 \tau_3 - 3649,4t \cdot \tau_3^2 + \\
 & + 7452,1t \cdot \tau_3 - 3840,1t^2 \cdot \tau_3 - 1613,8 \tau_3^4 + \\
 & + 95,524t^5 - 1581,8t^4 \tau_3 - 1093,5t^3 \tau_3^2.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) является аппроксимирующей моделью для описания формулы импульса $\mu_2(t, \tau_3)$ на втором участке. Значения интенсивности лазерного излучения на втором участке $\hat{P}(t, \tau_3)$, восстановленные по уравнению (6), приведены в табл. I и показывают достаточно высокую точность восстановления.

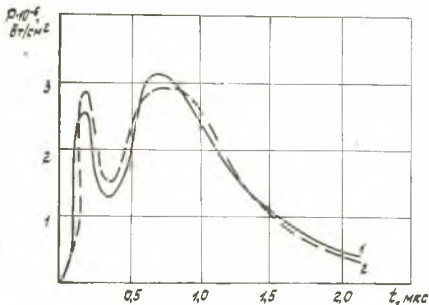
Окончательно упрощенная модель для управления имеет вид

$$P(t, \tau_3) = P_1(t, \tau_3) + P_2(t, \tau_3). \quad (7)$$

На рис. 3 и 4 показаны экспериментальные и восстановленные зависимости излучения от времени при $\tau_3 = 390$ нс, $\tau_3 = 200$ нс.



Р и с. 3. Экспериментальная (1) и восстановительная (2) зависимости интенсивности излучения от времени $\tau_3 = 390$ нс



Р и с. 4. Экспериментальная (1) и восстановительная (2) зависимости интенсивности излучения от времени $\tau_3 = 200$ нс

Предположим теперь, что мы хотим использовать уравнение (7) для управления формой импульса излучения с помощью ЗВМ. Очевидно, что возможны при этом следующие постановки задач.

1. Задана некоторая "эталонная" форма импульса P_{3T}^* . Требуется определить такое τ_3 , чтобы действительная форма импульса $P(t)$, τ_3 наименьшим образом отличалась от "эталонной".

2. Задан закон изменения максимума первого пика излучения во времени $P_{max}^*(t)$. Требуется определить закон изменения τ_3 , отслеживающий $P_{max}^*(t)$.

Уточним постановку первой задачи и рассмотрим пути ее решения. С этой целью заметим, что "эталонную" форму импульса удобно задавать таблицей значений $P_{3T}^*(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$. В этом случае можно составить критерий, характеризующий среднеквадратическое отклонение импульса $P(t, \tau)$ от $P_{3T}^*(t, \tau)$,

$$\sigma^2(\tau_3) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{3T}^*(t_i) - P(t_i, \tau_3))^2 \quad (8)$$

Задача определения τ_3 сводится к минимизации $S^2(\tau_3)$ по τ_3 . Удобным методом решения задачи минимизации в нашем случае является метод половинного деления [5], при котором скорость сходимости τ_3^n к τ_3^* характеризуется геометрической прогрессией. Можно оценить количество необходимых итераций по методу половинного деления для нахождения τ_3^* с заданной точностью $\delta\tau$. Пусть допустимые значения τ_3 лежат в интервале τ_{min} . На каждом шаге поиска интервал уменьшается в два раза. Отсюда очевидно, что после n итераций величина погрешности

$$|\tau_3(n) - \tau_3^*| \leq \frac{1}{2^n} (\tau_{max} - \tau_{min}). \quad (9)$$

Очевидно, что нужно выбрать такое n , при котором

$$\frac{1}{2^n} (\tau_{max} - \tau_{min}) \leq \delta\tau.$$

Пусть $\tau_{max} = 600$, $\tau_{min} = -300$ и требуемая точность $\delta\tau = 9$, тогда легко видеть, что требуемая точность достигается при $n = 7$.

Оценим время решения данной задачи на ЭВМ в режиме непосредственного оперативного управления, так как именно это время определяет быстродействие автоматизированной лазерной системы с программируемой формой импульса. С этой целью необходимо оценить примерное количество операций, требуемое для одной итерации поиска. Общее количество операций, необходимых для вычислений $\hat{P}(\tau)$ по формулам (5)–(6), составляет около 90 арифметических и логических операций. Расчет одной суммы (8) потребует при $M = 20$ примерно 1800 операций. Таким образом для выполнения n итераций по методу половинного деления необходимо выполнить $\sim 1800(n + 1)$ операций. Если $n = 7$, получим $M \sim 14400$ операций. В число этих операций не вошли операции по выборке значений из массивов, логическому сравнению в процессе поиска операций по вводу-выводу результатов из оперативной памяти ЭВМ в канал сопряжения. Для учета этих операций увеличим M , приняв $M = 20000$ оп.

При быстродействии процессора 500 тыс. оп/с получим ориентированное время вычисления $T_{выч}$ оптимального τ_3 : $T_{выч} = 20/500 = 0,04$ с. Эта оценка носит приблизительный характер, так как в расчетах не учитывалось различие между типами операций, выполняемых в процессе поиска τ_3^* , и время задержки в каналах свя-

зи. По нашим предположениям время $T_{\text{вдл}}$ в реальной системе может увеличиваться в 2-10 раз. Следует, однако, заметить, что данный вариант расчета времени реакции ЭВМ основан на том предположении, что "эталонные" импульсы различны для каждого периода излучения. Если выдавать серию по K импульсов одинаковой формы и после того изменять форму эталонного импульса, быстродействие системы управления увеличится в K раз.

При второй постановке задачи задается закон изменения максимума первого пика во времени. Очевидно, что достаточно рассмотреть функцию $P_{\text{max}}^*(t)$ лишь в моменты времени $t = \theta, 2\theta, \dots, n\theta, \dots$, где θ - период излучения лазерной системы. Для определения $\tau_3^*(\theta)$, обеспечивающего равенство $P_{\text{ЭТ}}^*(\theta) = P_{\text{max}}^*(\theta)$, разрешим уравнение (3) относительно τ , получим

$$\tau = \sqrt{\frac{P_{\text{max}} - 1.5 \cdot 10^6}{37,8}} \quad (10)$$

Определить $\tau_3^*(\theta)$, отвечающее $P_{\text{ЭТ}}^*(\theta)$, можно теперь, подставив $P_{\text{ЭТ}}^*(\theta)$ в формулу (10):

$$\tau_3^*(\theta) = \sqrt{\frac{P_{\text{ЭТ}}^*(\theta) - 1.5 \cdot 10^6}{37,8}} \quad (11)$$

Время выполнения $\tau_3^*(\theta)$ складывается из времени, необходимого для вычислений по формуле (11). Это время существенно меньше времени, необходимого для вычислений при первом способе управления. Время управления при этом способе будет складываться в основном из времени, необходимого для прохождения сигнала по каналам связи. Реальная величина этого времени, по нашим предположениям, составит $0.5 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-3}$ с. Более точное значение времени реакции можно выяснить только экспериментальным путем.

Выводы. 1. Установлено, что для управления формой импульса лазерного излучения может быть использована эмпирическая модель.

2. Апробация построенной эмпирической модели на ЭВМ ЕС-1050, основанной на реальных экспериментальных данных интенсивности лазерного излучения при различных τ_3 , показала достаточную точность восстановления формы импульса и пригодность модели для оперативного управления.

3. Проведенные расчеты показывают, что для построения замк-

нутого контура автоматизированного управления с периодичностью 0,01 Гц может быть использована ЭВМ типа СМ-1420.

Библиографический список

1. Понсмаренко А.Г., Тищенко В.Н. Препринт ИТПМ СО АН СССР, Новосибирск, 1987. № 1.
2. Максимов В.В., Орипич А.М., Пахомов Л.М., Понсмаренко А.Г. //Квантовая электроника. 6. 513 (1979).
3. Пахомов Л.М. Автоматизация измерений физических величин в быстропотекающих процессах //Взаимодействие лазерного излучения с веществом. ИТПМ СО АН СССР, 1980.
4. Бахвалов Л.А., Прахова Р.А. Регрессионный анализ многомерных полиномиальных моделей //Автоматизация обработки экспериментальных данных в химии и химической технологии /Под ред. проф. А.В.Нетушила. М., 1976.
5. Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1972.

УДК 621.39:681.324

С.Л.Гавлиевский

МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

(г. Куйбышев)

Сокращение сроков и улучшение качества проектирования сетей связи (вычислительных сетей, сетей ЭВМ) может быть обеспечено только за счет широкого использования САПР на всех этапах проектирования, начиная с самых ранних. Ядром САПР являются модели для расчета характеристик сетей. В настоящей работе рассмотрены эффективные с вычислительной точки зрения и простые с точки зрения программной реализации аналитические модели, ориентированные на использование в соответствующих САПР.

Известные децентрализованные методы маршрутизации могут быть развиты на два класса: последовательные и параллельные /1/. При использовании последовательных методов по сети передается одна