

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ЛУЧОМ

А. В. ДЕМИН

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dav_60@mail.ru

Рассматривается метод параллелизации вычислений при моделировании системы управления оптическим лучом в режиме поиска и наведения. Продемонстрировано, что если математическая модель процесса вычислений может быть представлена в виде совокупности соотношений, как и сам физический процесс — в виде действий, то компьютерная модель позволяет реализовать параллельные вычисления, а соответственно и повысить эффективность процесса управления.

Ключевые слова: *оптический луч, математическая модель, оптические клинья, сканирование, слежение.*

С ростом производительности компьютеров расширяются возможности по решению все более сложных математических задач, связанных с управлением динамическими системами в реальном масштабе времени при наличии внешних возмущений. К таким задачам, в частности, относятся задачи автоматизированного управления сложными динамическими системами, инвариантными к внешним возмущениям (или системами реального времени).

Качество решения по функционированию системы целиком зависит от математической модели управляющей системы, и, как правило, чем сложнее математическая модель, тем более адекватна реакция системы на входную информацию. Однако сложная математическая модель требует более длительного процесса вычислений при равных аппаратных возможностях. Таким образом, увеличивается время реакции системы, что может быть недопустимо при работе в реальном масштабе времени. Зачастую эту проблему решают путем установления соответствия между корректностью математической модели и производительностью системы, однако не всегда возможно найти приемлемое решение за отведенное время. Безусловно, немаловажно учитывать и производительность аппаратной части системы; современные компьютеры предоставляют для этого большие возможности: например, высокая производительность (несколько миллиардов операций в секунду), предсказания переходов, конвейерная обработка и т.д.

В настоящей статье рассматривается способ оптимизации математической модели за счет ее параллелизации, что позволяет увеличить производительность системы управления и тем самым максимально использовать имеющиеся ресурсы. Показаны преимущества метода параллелизации расчетов в системах оптической локации, где управление лучом реализуется с помощью оптических клиньев.

Основу любой системы управления составляет набор действий, которые можно представить в виде конечного автомата, где узлы есть состояния системы, а связи — действия, производимые системой в зависимости от разных условий. Тем самым при каждом следующем состоянии системы на ее вход поступает информация, накопленная на всех предыдущих состояниях. Идея оптимизации системы заключается в преобразовании этого конечного автомата таким образом, чтобы как можно больше действий выполнялось параллельно и синхронно, при этом результат работы системы в целом не изменился бы. Такой процесс и есть параллелизация модели [1].

Рассмотрим применение метода имитационного моделирования для поиска оптимального алгоритма управления оптическим лучом по двум координатам с помощью пары оптических клиньев. Управление лучом в комплексах оптической локации реализуется сложной динамической системой, работающей в реальном масштабе времени при наличии внешних возмущений, при этом фактор времени от момента распознавания возмущения до момента его парирования является очень критичным [2—10].

В общем виде аналитические соотношения, описывающие работу системы, включают в себя значения показателей преломления материала оптических клиньев, преломляющих углов клиньев и углов их поворота. Естественно поиск оптимального алгоритма управления одновременно с учетом качества изображения практически невозможен. В этой связи целесообразно произвести декомпозицию системы на две подсистемы — подсистему, обеспечивающую движение луча, и подсистему, обеспечивающую качество изображения. Тогда поиск оптимальной математической модели для реализации системы управления лучом можно разделить на три этапа.

1. Поиск значений преломляющих углов и показателей преломления, обеспечивающих требуемое качество изображения.

2. Поиск алгоритма поворота клиньев при выбранных предварительно значениях преломляющих углов и показателей преломления материала.

3. Корректировка алгоритма поворота клиньев с учетом результатов второго этапа.

Наиболее сложным является 2-й этап, его и рассмотрим. Используя закон преломления в векторной форме

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_m &= \frac{n_{m-1}}{n_m} (\mathbf{A}_{m-1} + \Gamma_m \mathbf{N}_m); \\ \Gamma_m &= \cos \alpha_m - \frac{n_m}{n_{m-1}} \sqrt{1 - \left(\frac{n_m}{n_{m-1}}\right)^2 (1 - \cos^2 \alpha_m)}; \\ \cos \alpha_m &= -(\mathbf{A}_{m-1} \cdot \mathbf{N}_m), \\ m &\in [1, 2, 3, 4] \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

и опуская промежуточные вычисления, уравнения траектории луча по двум направлениям в угловой мере в картинной плоскости XOY для пары оптических клиньев в общем виде можно представить следующим образом [11—13]:

$$\left. \begin{aligned} X &= 2\Gamma \sin \beta \cos \alpha; \\ Y &= -2\Gamma \sin \alpha \cos \beta; \\ \alpha &= \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}; \beta = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}; \\ \Gamma &= |\Gamma_1 \sigma_1| = |n_2 \Gamma_4 \sigma_2|; \\ \Gamma_1 \sigma_1 &< 0; n_2 \Gamma_4 \sigma_2 > 0, \\ \operatorname{sgn}(\Gamma_1 \sigma_1) &= -\operatorname{sgn}(n_2 \Gamma_4 \sigma_2). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

В формулах (1a), (16) приняты следующие обозначения: \mathbf{A}_m — вектор луча, падающего на m -ю преломляющую поверхность клина; \mathbf{N} — вектор нормали преломляющих поверхностей клиньев; Γ_m — стигматическая постоянная для m -й преломляющей поверхности клина; φ_1, φ_2 — углы поворота первого и второго оптических клиньев с преломляющими углами σ_1, σ_2 и показателями преломления n_1, n_2 соответственно; X, Y — угловые координаты луча \mathbf{A}_4 , отсчитываемые от оси OZ (оптическая ось).

При $X \neq 0 \Rightarrow \cos \alpha \neq 0 \Rightarrow \alpha \neq \pi/2 + \pi K_\alpha$ решение уравнений (1б) относительно α и β в общем виде для картинной плоскости XOY будет следующим:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \operatorname{arctg}\left(-\frac{Y}{X}\right) + \pi K_\alpha; \\ \beta &= (-1)^{K_\beta} \operatorname{arcsin}\left[\frac{X}{2\Gamma \cos \alpha}\right] + \pi K_\beta, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где K_α, K_β — целые числа; отсюда углы φ_1 и φ_2 поворота клиньев в зависимости от требуемого направления луча \mathbf{A}_4 относительно оси OZ описываются следующими выражениями:

— для реализации режима непрерывного обзора пространства (режим сканирования):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha - \beta = \alpha - (-1)^{K_\beta} \operatorname{arcsin}\left[\frac{X}{2\Gamma \cos \alpha}\right] + \pi K_\beta, \\ \varphi_2 &= \alpha + \beta = \alpha + (-1)^{K_\beta} \operatorname{arcsin}\left[\frac{X}{2\Gamma \cos \alpha}\right] + \pi K_\beta; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

— для реализации режима слежения за объектом или наведения на него (режим работы в I -м квадранте):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \operatorname{arctg}\left(-\frac{Y}{X}\right) + \operatorname{arcsin}\left[\frac{X}{2\Gamma \cos\left[\operatorname{arctg}\left(-\frac{Y}{X}\right)\right]}\right], \\ \varphi_2 &= \operatorname{arctg}\left(-\frac{Y}{X}\right) - \operatorname{arcsin}\left[\frac{X}{2\Gamma \cos\left[\operatorname{arctg}\left(-\frac{Y}{X}\right)\right]}\right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Ограничившись главными значениями аргументов и вычислив $\operatorname{arctg}(\arg)$ и $\operatorname{arcsin}(\arg)$, можно параллельно рассчитать суммы и разности в выражениях (3), (4), получив тем самым значения φ_1 и φ_2 одновременно, что позволяет реализовать параллельное управление.

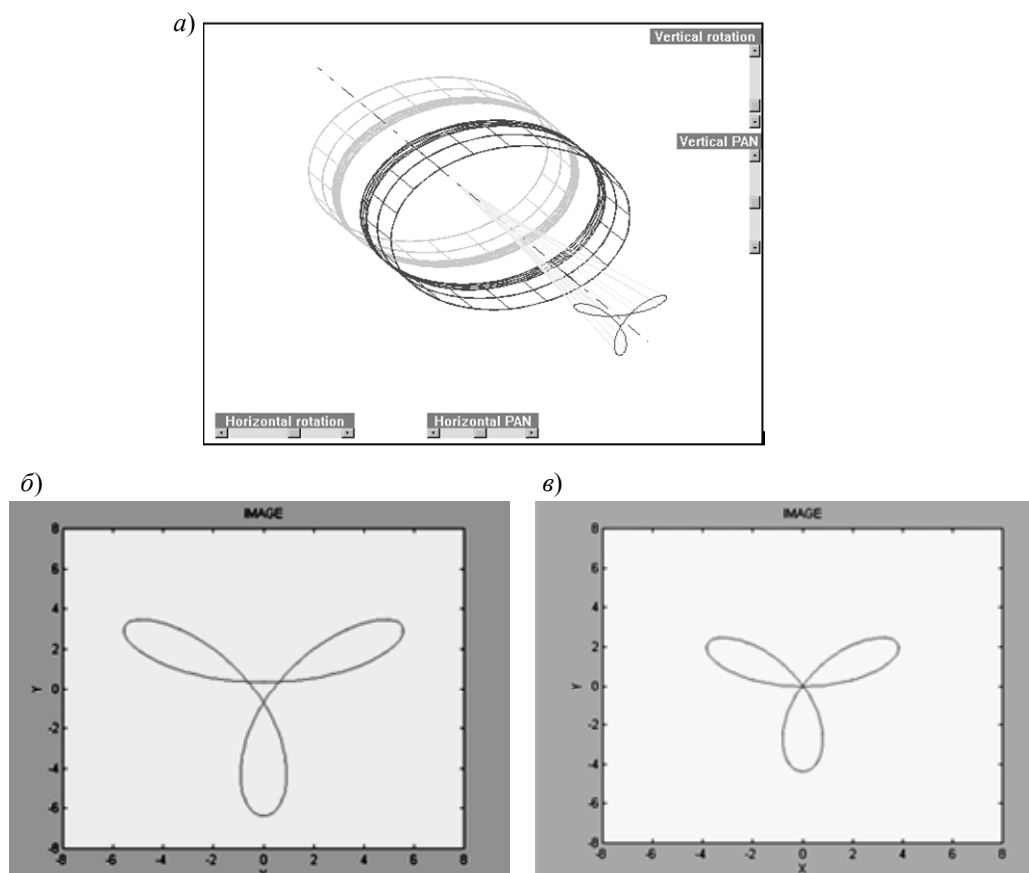
Полученные соотношения были апробированы в ходе эксперимента при создании системы параллельного управления линией визирования оптико-электронной системы в режиме сканирования пространства по двум угловым направлениям.

На рисунке представлено графическое отображение (а) режима сканирования пространства по колебательно-вращательной розеточной траектории с помощью пары оптических клиньев в соответствии с соотношениями (3):

$$\left. \begin{aligned} X &= R(1 - Cq\gamma\pi^{-1}) \cos \gamma; \\ Y &= R(1 - Cq\gamma\pi^{-1}) \sin \gamma; \\ 0 &\leq \gamma \leq q\pi^{-1}; C \leq R; \\ \operatorname{tg} \gamma &= q\pi^{-1} - \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где R — радиус сканируемой зоны; C — амплитуда колебательного движения; q — коэффициент цикличности развертки (целое число).

Моделирование процесса вычисления углов φ_1 , φ_2 поворота клиньев и проверка соответствия полученных результатов согласно выражениям (3) проводились с использованием пакета MatLab SIMULINK.



Исходные параметры оптических клиньев: показатель преломления оптического материала клиньев 1,5163, преломляющий угол клиньев 0,017446 рад. С целью минимизации величины бокового смещения луча (см. рисунок, б) в ходе моделирования было подобрано соотношение угловых скоростей клиньев, что возможно при параллелизации процессов вычисления углов φ_1 и φ_2 (см. рисунок, в).

Таким образом, показано, что если математическая модель процесса представима в виде совокупности соотношений, как и сам физический процесс — в виде действий, то компьютерная модель позволяет реализовать параллельные вычисления, а соответственно и повысить эффективность процесса управления. Преимущество параллелизации моделирования на компьютере показано на примере сканирующей системы, выполненной с использованием пары оптических клиньев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А. В., Зверев С. К. Оптимизация алгоритма управления оптическим лучом методом имитационного моделирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2004. № 14.
2. Катус Г. П. Автоматическое сканирование. М.: Машиностроение, 1969.
3. Катус Г. П., Кравцов Н. В., Чирков Л. Е. Модуляция и отклонение оптического излучения. М.: Машиностроение, 1987.
4. Еськов Д. Н. и др. Автоматическая стабилизация оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1988.
5. Якушенков Ю. Г. Теория оптико-электронных приборов. М.: Логос. 2004.

6. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977.
7. Пат. на полезную модель № 65253. Приемопередающий блок светолокационного измерителя высоты нижней границы облаков / О. А. Волков, А. В. Демин, К. В. Константинов, В. А. Проценко. Заявка № 2007110054. Приор. от 19.03.2007.
8. А. с. 1157514 СССР. Устройство для изменения направления распространения и фокусировки световых лучей / А. В. Демин, С. Д. Медведев, И. В. Петров, Т. Ю. Перцович // Б. И. 1985.
9. Демин А. В., Даниэль С. В. Оптическая система оптико-электронной аппаратуры для пеленгования импульсных источников теплового излучения // Исследования в области оружия и систем вооружения, авиа- и ракетостроения, космических ЛА: Сб. статей. СПб: БГТУ, 2010.
10. Демин А. В., Даниэль С. В. Оптико-электронная аппаратура для пеленгации импульсных источников теплового излучения // Исследования в области оружия и систем вооружения, авиа- и ракетостроения, космических ЛА: Сб. статей. СПб: БГТУ, 2010.
11. Демин А. В., Граматин А. П., Козодой В. В. Двухкоординатное развертывание луча в гирооптическом модуле // Оптико-электронные приборы и системы: Сборник (Серия „Сборник научных статей“) СПб: СПб ГИТМО, 1993. Вып. 97. С. 50—57.
12. Пат. 2097811 РФ. Способ развертывания оптического луча / А. П. Граматин, А. В. Демин, А. А. Джаманбаев, В. В. Козодой. Приор. от 27.02.1995.
13. Пат. 2097812 РФ. Способ развертывания оптического луча / А. П. Граматин, А. В. Демин, А. А. Джаманбаев, В. В. Козодой. Приор. от 27.02.1995.

Сведения об авторе

Анатолий Владимирович Демин — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра оптико-цифровых систем и технологий; E-mail: dav_60@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
31.08.15 г.

Ссылка для цитирования: Демин А. В. Математическая модель системы управления оптическим лучом // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 890—894.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL BEAM CONTROL

A. V. Demin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: dav_60@mail.ru

Application of the parallel computing method in modeling of optical beam control in search and pointing modes is considered. It is shown that if mathematical model of calculation process may be represented as a set of relations, and the physical process under control takes a form of actions, then the computer model allows for realization of parallel calculations and therefore makes it possible to increase the efficiency of the control.

Keywords: optical beam, mathematical model, optical wedge, scanning, tracking.

Data on author

Anatoly V. Demin — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical and Digital Systems and Technologies; E-mail: dav_60@mail.ru

For citation: Demin A. V. Mathematical model of optical beam control // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 11. P. 890—894 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-890-894