УДК 681.3.0+004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА ОПТИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ

Пинчук В.П., к. ф.-м. н., доцент, Вишневская В.Г., к. т. н., доцент

Запорожский национальный технический университет

Рассмотрена задача расчета коэффициента передачи оптического контакта, включающего в себя излучатель и регистратор светового сигнала. Получены выражения для расчета коэффициента оптической передачи для случая, когда активные поверхности излучателя и фотоприемника имеют произвольную форму. Показано, что расчет сводится к вычислению двойного интеграла по поверхностям. Для целей моделирования оптоэлектронных устройств предложено использовать метод Монте-Карло, получены соответствующие рабочие формулы. Рассмотрен пример практического моделирования передачи сигнала для случая, когда активные поверхности оптического контакта являются плоскими и имеют круглую форму.

Ключевые слова: оптоэлектронная система, оптический контакт, моделирование, САПР, метод случайных испытаний.

Пінчук В.П., Вишневська В.Г. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ ОПТИЧНИМ КОНТАКТОМ / Запорізький національній технічний університет, Україна.

Розглянуто задачу розрахунку коефіцієнта передачі оптичного контакту, який вміщує випромінювач та реєстратор світлового сигналу. Отримано формули для розрахунку коефіцієнта оптичної передачі для випадку, коли активні поверхні випромінювача та фотоприймача мають довільну форму. Показано, що розрахунок зводиться до обчислення подвійного інтегралу за поверхнями. Для моделювання оптоелектронних пристроїв запропоновано застосувати метод Монте-Карло, отримано відповідні робочі формули. Розглянуто приклад практичного моделювання передачі сигналу для випадку, коли активні поверхні оптичного контакту є пласкими і мають круглу форму.

Ключові слова: оптоелектронна система, оптичний контакт, моделювання, САПР, метод випадкових випробувань.

Pinchuk V.P., Vishnevskaia V.G. MODELLING OF THE SIGNAL TRANSFERRING BY OPTICAL CONTACT / Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.

The problem of calculation of the optical contact transfer coefficient including a radiator and the registrar of a light signal is considered. Expressions for calculation of optical transfer coefficient for a case when active surfaces of a radiator and a photo detector have the any form are received. It is shown, that calculation is reduced to calculation of double integral on surfaces. For the purposes of modeling optoelectronic devices it is offered to use Monte Carlo method, and corresponding formulas are received. The example of practical modeling of a signal transferring for case when active surfaces of optical contact are flat and have the round form is considered.

Key words: optoelectronic system, optical contact, modeling, CAD, Monte-Carlo method.

1. КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКОЙ ПАРЫ

Современные электронные устройства и системы нередко включают в себя разного рода оптоэлектронные элементы, что позволяет использовать наряду с электронными также и оптические средства обработки информации. При проектировании такого рода устройств средствами САПР, необходимо располагать библиотекой моделей компонентов системы, включающей в себя электронные, оптоэлектронные и оптические элементы. Одним из таких элементов, получивших широкое распространение в современных устройствах, является оптический контакт [1]. Последний часто используется, например, для передачи сигнала из одной печатной платы в другую. Ниже представлена математическая модель оптического контакта, позволяющая получить значение коэффициента передачи оптического контакта с заданными геометрическими параметрами.

Оптический контакт будем представлять как пару "источник излучения – фотоприемник". Коэффициентом передачи оптического контакта является отношение

$$E = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}, \tag{1}$$

где Φ_1 - световой поток, излучаемый источником, а Φ_2 - световой поток, проходящий через активную область фотоприемника.

Будем считать, что активные поверхности излучателя и приемника имеют плоскую форму и лежат в плоскостях, параллельных плоскости xOy. Полагаем, что диаграмма излучения источника и диаграмма чувствительности приемника имеют косинусный тип. Считаем также, что излучаемый источником поток распределен равномерно по его активной поверхности, а светимость ее составляет величину K.

Величина светового потока, излучаемого элементом поверхности $d\sigma_1$ и проходящего через элемент поверхности $d\sigma_2$ фотоприемника, в соответствии с принятыми соглашениями, будет равна:

$$\frac{K}{\pi r^2}\cos^2(\varphi)\,d\sigma_1 d\sigma_2 \ ,$$

где r – расстояние между элементами поверхностей $d\sigma_1$ и $d\sigma_2$, φ – угол между направлением $d\sigma_1 - d\sigma_2$ и нормалью к поверхности излучателя (рис. 1). Величина полного светового потока через поверхность фотоприемника Φ_2 будет определяться кратным интегралом следующего вида:

$$\Phi_2 = \frac{K}{\pi}\int\limits_{D_2}\int\limits_{D_1}\frac{\cos^2(\varphi)}{r^2}\,d\sigma_1\,d\sigma_2 \,. \tag{2}$$

Здесь D_1, D_2 – области интегрирования, соответствующие активной поверхности излучателя и фотоприемника, соответственно.

Обозначим через S_1 – величину активной поверхности излучателя и S_2 – величину активной поверхности фотоприемника. Тогда:

$$\Phi_1 = KS_1,$$

и для коэффициента передачи будем иметь:

$$E = \frac{1}{\pi S_1}\int\limits_{D_2}\int\limits_{D_1}\frac{\cos^2(\varphi)}{r^2}\,d\sigma_1\,d\sigma_2 \ . \tag{3}$$

Пусть h – расстояние между плоскостями излучателя и фотоприемника, (x_1,y_1) – координаты элемента интегрирования $d\sigma_1$, (x_2,y_2) – то же самое для $d\sigma_1$, тогда $\cos(\varphi)=h/r$ и равенство (3) можно представить следующим образом:

$$E = \frac{h^2}{\pi S_1}\int\limits_{D_1}\int\limits_{D_2}\frac{d\sigma_1 d\sigma_2}{[h^2+(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2]^2} \ , \tag{4}$$

При непосредственном наложении поверхности излучателя на поверхность фотоприемника без зазора, т.е. при h=0, будем иметь точку сингулярности, в которой выражения (2–4) работать не будут. В этом случае поток Φ_2 определяется таким выражением:

$$\Phi_2 = K\int\limits_{D_1\cap D_2} d\sigma_1 \ ,$$

и, учитывая, что $\Phi_1 = K\,S_1$, для коэффициента передачи будем иметь:

$$E = \frac{1}{S_1}\int\limits_{D_1\cap D_2} d\sigma_1 \,. \tag{5}$$

Потребуем, чтобы математическая модель оптического контакта работала для поверхностей D_1 и D_2 произвольной формы. Использование аналитических (также как и стандартных численных) методов приводит к затруднениям при вычислении кратного интеграла (6) [2]. Поэтому оправданным представляется использование для построения модели метода Монте-Карло (статистических испытаний) [3,4].

2. МЕТОД СЛУЧАЙНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В основе метода случайных испытаний (метод Монте-Карло или МК-метод) для вычисления интегралов лежит известная теорема о среднем, которая в случае одномерного интеграла записывается следующим образом:

$$\int\limits_a^b f(x)dx = (b-a)\cdot\overline{f(x)} \ ,$$

где $\overline{f(x)}$ - среднее значение подынтегральной функции на [a,b]. Для оценки среднего значения функции f(x) используются случайные точки $x_i \in [a,b]$ с равномерным распределением. Для кратного интеграла с многомерной областью интегрирования Q теорема о среднем выглядит так:

$$\int\limits_{Q}\!\dots\!\int f(q)dq = V_Q \cdot \overline{f(q)} \,, \tag{6}$$

где q – радиус-вектор точки в области Q, а V_Q – объем этой области:

$$V_Q = \int\limits_{Q}\!\dots\!\int dq \,.$$

Среднее значение подынтегральной функции $\overline{f(x)}$ оцениваем методом случайных испытаний:

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} f(q_k) \,, \tag{7}$$

где q_k – k-тая случайная точка в области интегрирования Q , M – общее число случайных точек (испытаний), выбираемых для оценки среднего. Отметим несколько важных моментов:

а) случайные точки q_k необходимо выбирать в пределах многомерной области интегрирования Q, имеющей в общем случае произвольную конфигурацию;

б) они должны иметь равномерное распределение;

в) кроме вычисления среднего, правило (8) предполагает вычисление объема области интегрирования V_Q , которая может иметь сложную конфигурацию с криволинейными границами.

Для задания области интегрирования Q используется предикатная функция P(q), которая принимает значение "Истина", если $q \in Q$, и значение "Ложь" – в противном случае.

Для того чтобы избежать необходимости вычисления V_Q , используется следующий прием. В пространстве интегрирования, в котором действует вектор q, выберем
прямоугольную область

$$R = \coprod_{i=1}^{P}[a_i, b_i] \,, \tag{8}$$

где P – размерность пространства интегрирования.

Символ произведения означает декартово произведение отрезков $[a_i,b_i]$, а величина b_i-a_i представляют собой размер многомерного параллелепипеда R вдоль i-той оси координат. Область R выбирают так, чтобы выполнялось условие: $R \supseteq Q$. Предикатную функцию P(q) представим как целочисленную функцию, равную единице, если $q \in Q$, и нулю – если нет. Сгенерируем N случайных точек q, равномерно распределенных в области R. Тогда приближенное значение искомого интеграла можно получить следующим образом:

$$\int\limits_{Q}\!\dots\!\int f(q)dq = V_R \frac{M}{N}\sum_{k=1}^{N} P(q_k) f(q_k) \,, \tag{9}$$

где M представляет собой количество случайных точек q, попавших в область интегрирования Q:

$$M = \sum_{i=1}^{N} P(q_k) \,, \tag{10}$$

а V_R – объем прямоугольной области R:

$$V_R = \coprod_{i=1}^{P}(b_i - a_i) \,. \tag{11}$$

Под произведением здесь понимается уже результат арифметического умножения. Отметим, что погрешность вычисления интеграла будет минимальной, если, при выполнении условия $R \supseteq Q$, объем V_R будет минимальным.

Согласно общей теории метода статистических испытаний для вычисления кратных интегралов [4] с увеличением числа испытаний N погрешность получаемого результата уменьшается в соответствии с законом:

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{Const}}{\sqrt{N}} \quad . \tag{12}$$

3. ПРИМЕР

В качестве примера рассмотрим случай, когда области излучателя и приемника имеют круглую форму одинакового размера с радиусом R и смещены друг относительно друга в плоскости xOy на расстояние d (рис. 1).

Для h>0 из (4) получаем следующую формулу для расчета E:

$$E = \frac{h^2}{\pi^2 R^2} \int\limits_D \int\limits_D \frac{d\sigma_1 d\sigma_2}{[h^2 + (x_1 - x_2 - d)^2 + (y_1 - y_2)^2]^2} \ . \tag{13}$$

Здесь $D = D_1$, а область интегрирования D_2 перенесена так, что проекция ее центра совпадает с центром области D_1, который имеет координаты x=0, y=0 .

Из равенства (9) следует рабочая формула для расчета коэффициента передачи:

$$E = \frac{16 R^2 h^2}{\pi^2 N} \sum_{i=1}^{M} \frac{1}{[\,h^2 + (x_1^i - x_2^i - d)^2 + (y_1^i - y_2^i)^2\,]^2} \ , \tag{14}$$

где M определяется равенством (10), а предикат P(q) равен:

$$P(q) = P(x_1, y_1, x_2, y_2) = x_1^2 + y_1^2 \le R^2 \ \& \ x_2^2 + y_2^2 \le R^2 \ .$$

Для сингулярной точки h=0, исходя из (5) и применяя простые геометрические рассуждения, получаем такое выражение для расчета E:

$$E = \frac{2}{\pi}(\arccos(t) - t\sqrt{1 - t^2}) \ , \tag{15}$$

где $t = \dfrac{d}{2R}$.

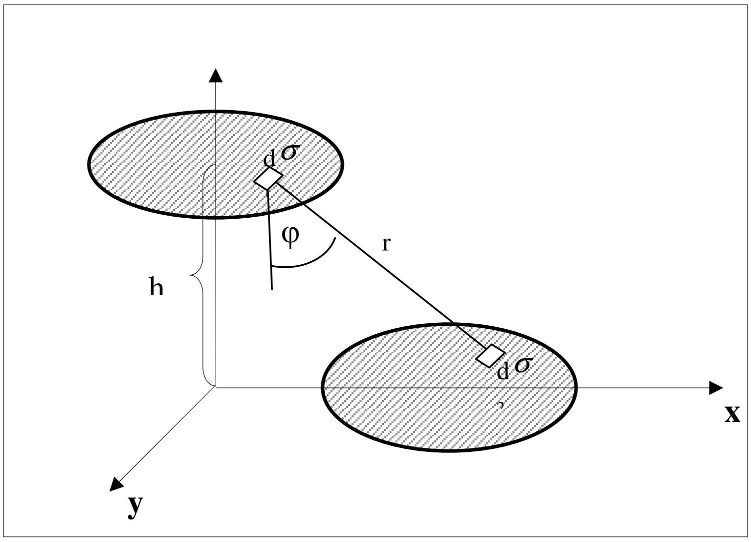

Рис.1. Поверхности излучателя и фотоприемника

Ниже, на рис. 2 приведены результаты расчета зависимости коэффициента передачи оптической пары E от величины зазора h для рассмотренного выше примера при следующих значениях параметров: N =

1000 (число испытаний), R = 1 (радиус активной поверхности излучателя и фотоприемника, произв. ед.), d = 0 (ошибка совмещения).

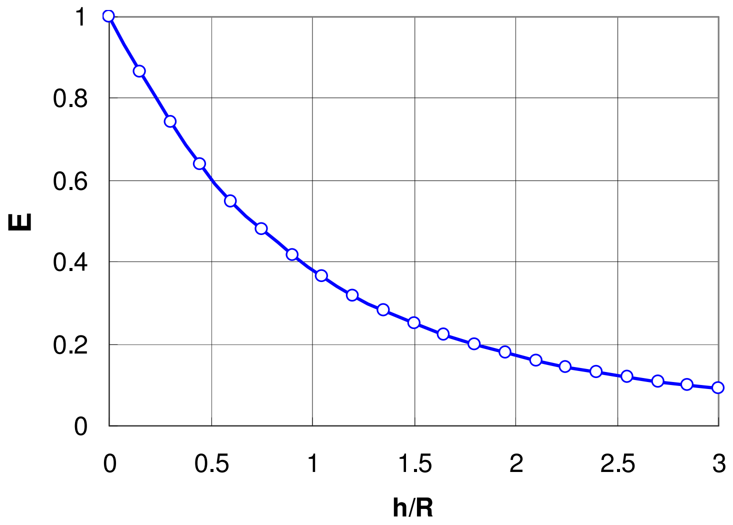

Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи E от величины зазора h при d = 0

На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости коэффициента передачи от ошибки совмещения центров активных областей излучателя и приемника при величинах зазора h = 0 и h = 0.4 R .

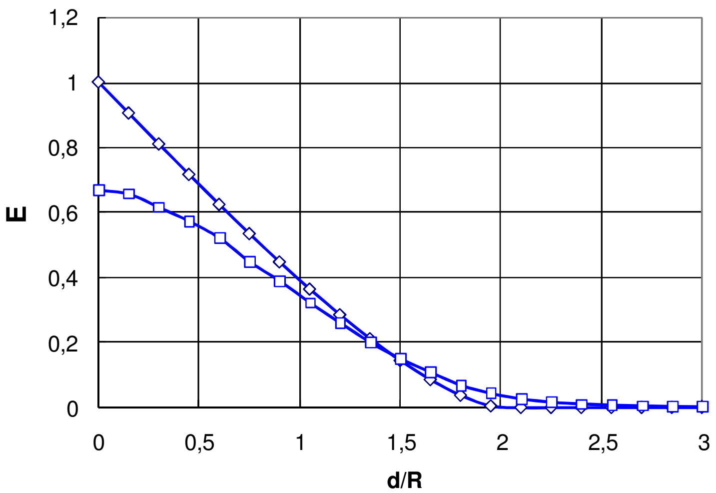

Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи E от ошибки совмещения d при h = 0 (верхняя кривая) и h = 0.4 R (нижняя кривая)

ЛИТЕРАТУРА

1. Камышанов, А.Ф., Пинчук, В.П. Модели полупроводниковых оптронов для автоматизированного анализа электронных схем [Текст] / А.Ф.Камышанов // Автоматизация проектирования в электронике: респ. межвед. науч.-техн. сб. / Киев, Техніка, 1984. – С. 87-93.
2. Разработка принципиальных основ и методик построения РЭА с использованием некондуктивных связей между элементами [Текст]: отчет о НИР (Заключит.): 6116 / ЗМИ, рук. Горбань А.Н.– Запорожье, 1987 - 125 с. - № ГР 01860063098. - Инв. № 02880025241.
3. Соболь, И.М. Метод Монте-Карло [Текст] / И.М.Соболь.– М.: Наука, 1985.– 80 с.
4. Ермаков, С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы [Текст] / С.М.Ермаков.– М.: Наука, 1975.– 440 с.