

УДК 535.317 + 621.383 + 535.8

РАСЧЁТ ДИСТАНЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

А. Г. Батулин

*АО «Научно-исследовательский институт электронных приборов»,
630005, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53
Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: rock_@mail.ru*

Предложена методика расчёта дистанционной характеристики оптоэлектронных систем, обеспечивающая повышенную точность по сравнению с известными методиками. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными.

Ключевые слова: оптоэлектронная система, расчёт параметров, дистанционная характеристика, трассировка лучей.

Введение. Одним из основных параметров оптоэлектронных систем, использующих амплитудный или амплитудно-базовый принцип действия (включая метод равносигнальной зоны), является дистанционная характеристика — зависимость амплитуды принимаемого сигнала от расстояния до отражающей поверхности, построенная для каждого из фоточувствительных элементов фотоприёмника. Дистанционная характеристика определяет помехозащищённость системы, ближнюю и дальнюю границы зоны действия, динамический диапазон входного сигнала при известных отражающих свойствах поверхности. Для систем, в основе которых лежит амплитудно-базовый метод с использованием равносигнальной зоны [1], дистанционная характеристика также задаёт расстояние, на котором выполняется равенство сигналов с соседних фоточувствительных элементов фотоприёмника. Крутизна дистанционной характеристики для каждой пары соседних каналов, образованных смежными полями зрения соседних фоточувствительных элементов фотоприёмника, в точке равенства их сигналов определяет точность фиксации этого расстояния.

Макетирование с последующим экспериментальным нахождением дистанционной характеристики не всегда возможно, в частности на стадии выработки требований к излучателю, фотоприёмнику и оптической системе. Поэтому методика расчёта дистанционной характеристики должна обеспечивать достоверность вычисления и возможность оптимизации оптической схемы системы на этапе её проектирования.

В настоящее время не существует методики для точного расчёта дистанционной характеристики в области малых расстояний — в ближней зоне. Например, методики, приведённые в [1, 2], дают довольно грубую её оценку. В то же время достоверность дистанционной характеристики в ближней зоне особенно важна при расчёте сигналов, отражённых от аэрозолей [3]. Эта проблема частично рассмотрена в [4].

Целью данной работы является создание основанной на адаптируемой модели методики расчёта дистанционной характеристики оптоэлектронной системы, позволяющей получить результаты с повышенной точностью.

Условия сравнения расчётных и экспериментальных данных. На рис. 1 приведены расчётная и экспериментальная дистанционные характеристики для оптоэлектронной системы, в основе которой лежит метод равносигнальной зоны, реализованный с

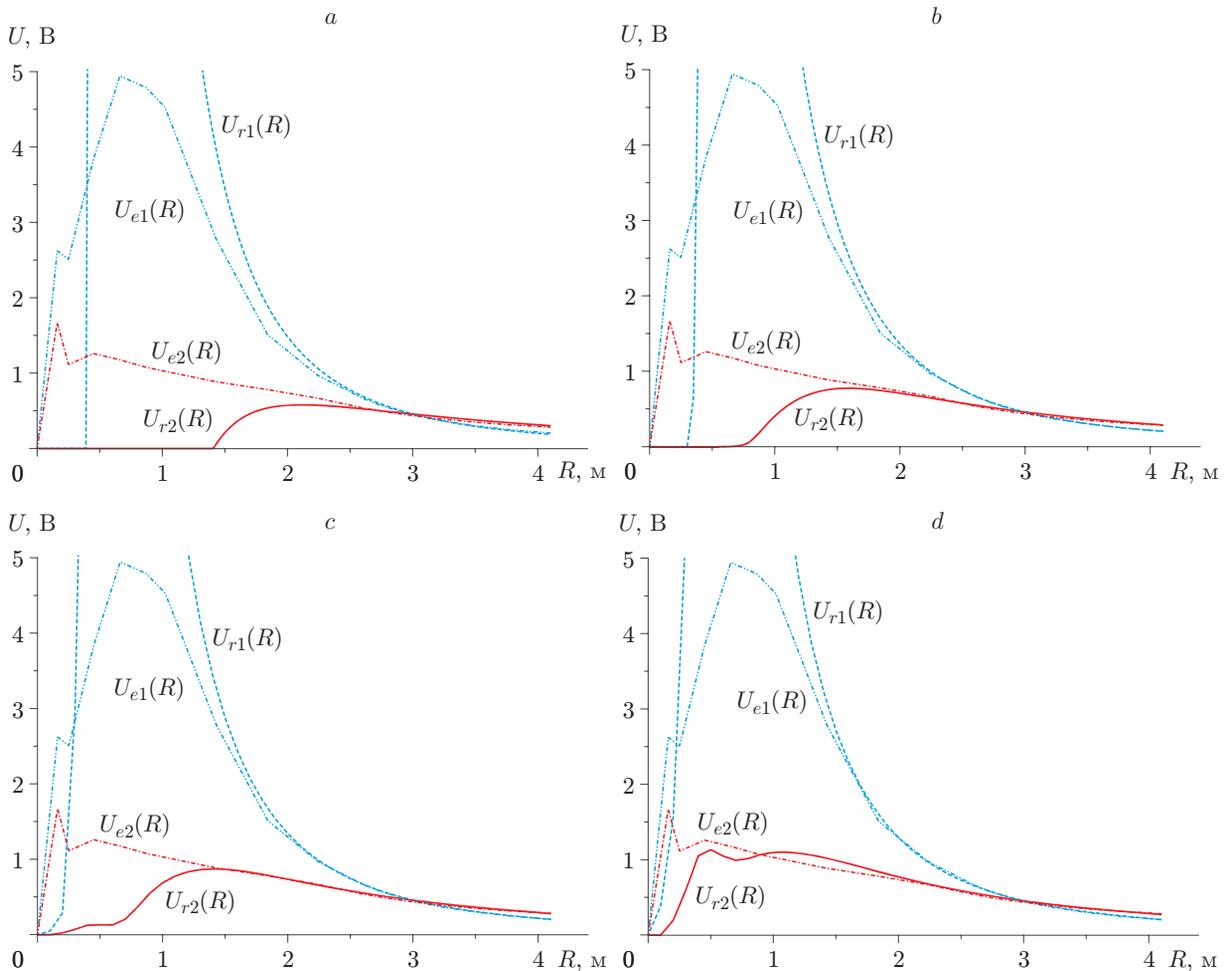


Рис. 1. Сравнение расчётной и экспериментальной дистанционных характеристик ($U_{r1}(R)$, $U_{e1}(R)$ и $U_{r2}(R)$, $U_{e2}(R)$ — расчётные и экспериментальные выходные сигналы с первой и второй площадок фотоприёмника): *a* — без учёта формы диаграмм направленности, *b* — по диаграммам направленности, *c* — предлагаемым методом, *d* — предлагаемым методом с использованием эмпирического коэффициента равного 10

помощью фотоприёмника с двумя фоточувствительными элементами. Для получения экспериментальной дистанционной характеристики использовался отражатель с коэффициентом диффузного отражения $\rho = 0,8$ (лист ватмана), установленный на расстоянии R от оптоэлектронной системы перпендикулярно к её оптической оси. Расстояние R изменялось дискретно в диапазоне от 0 до 4 м. Для каждого расстояния R измерялась амплитуда выходных напряжений с фотоприёмного устройства оптоэлектронной системы. Наиболее вероятной причиной пика на расстоянии $\sim 0,2$ м являются переотражения между корпусом системы и отражателем.

Анализ факторов, определяющих дистанционную характеристику, и существующих методик расчёта. Как следует из [1], амплитуда принимаемого сигнала определяется уравнением светолокации:

$$P_{\text{пр}}(R) = \frac{P_0 \rho \cos(\theta) S_{\text{вх}} K_S(R)}{2\pi R^2},$$

где $P_{\text{пр}}$ — мощность принятого сигнала (Вт); P_0 — излучаемая мощность (Вт); $S_{\text{вх}}$ — площадь входного зрачка приёмного объектива (м^2); $K_S(R)$ — коэффициент перекрытия

приёмной и передающей диаграмм направленности; ρ — коэффициент отражения поверхности; θ — угол между вектором излучения и нормалью к поверхности; R — расстояние до отражающей поверхности (м).

Ключевым моментом расчёта дистанционной характеристики является вычисление коэффициента перекрытия приёмной и передающей диаграмм направленности $K_S(R)$, поскольку он оказывает наибольшее влияние на форму дистанционной характеристики. Низкая точность существующих методик расчёта дистанционной характеристики связана с отсутствием методики, позволяющей достоверно определить коэффициент $K_S(R)$ в ближней зоне. В частности, методики, приведённые в [1, 2], не учитывают ни аберраций приёмного и передающего объективов системы, ни гауссова распределения интенсивности лазерного излучения [4]. В них принято считать приёмную и передающую диаграммы направленности прямоугольными функциями, что является довольно грубым приближением. Это связано с тем, что данная модель не учитывает большинства факторов, один из которых — аберрации приёмного и передающего объективов. Результаты вычисления дистанционной характеристики оптоэлектронной системы приведены на рис. 1, *a*. Расчёт показал наличие «мёртвой» зоны дистанционной характеристики — области малых расстояний, в которой отражённый сигнал отсутствует, что неприемлемо для некоторых применений. Также расчёт выявил значительное различие амплитуд максимумов дистанционной характеристики (амплитуда максимума U_{r1} примерно в 5,5 раза выше экспериментальной).

Повышение точности возможно при использовании расчётных диаграмм направленности передатчика и приёмника (выполненных, например, с помощью программы Zemax) вместо прямоугольных. В то же время этот метод не позволяет достоверно определить дистанционную характеристику в ближней зоне (рис. 1, *b*), а также показывает наличие у системы меньшей по размеру мёртвой зоны дистанционной характеристики по сравнению с предыдущим методом. Кроме того, амплитуда максимума U_{r1} примерно в 4 раза больше экспериментальной.

Очевидно, что на дистанционную характеристику в ближней зоне влияет расфокусировка изображения на светочувствительной площадке фотоприёмника на малом расстоянии до объекта, в особенности для сверхсветосильных приёмных объективов с относительным отверстием 1:1–1:0,7, которые применяются для обеспечения энергетических характеристик локационной системы.

Повышение достоверности расчёта. Для расчёта дистанционной характеристики предложен метод трассировки лучей. При этом имитируется распространение излучения от источника до отражающей поверхности, диффузное отражение и распространение излучения в обратном направлении до фотоприёмника. Процесс повторяется для каждого из расстояний до отражающей поверхности. Данный метод автоматически учитывает аберрации объективов и расфокусировку изображения. Особенностью метода является то, что он напрямую вычисляет дистанционную характеристику, а не коэффициент перекрытия приёмопередающих диаграмм. Благодаря тому что при расчёте дистанционной характеристики также происходит расчёт диаграмм направленности передатчика и приёмника оптоэлектронной системы, на основе этой методики возможно построение модели системы, учитывающей помеховые и фоноцелевые факторы.

Дальнейший анализ факторов, влияющих на дистанционную характеристику, показал, что излучение, зеркально отражённое от светочувствительной площадки фотоприёмника, после переотражений может оказать существенное влияние на уровень сигнала в ближней зоне. Из-за высокого показателя преломления кремния (в области видимого света $n = 4\text{--}5,5$) [5] амплитуда отражённой компоненты будет достаточно высока. Последующие переотражения можно классифицировать как:

- зеркальное отражение от непросветлённого защитного стекла фотоприёмника;
- смешанное отражение от элементов конструкции фотоприёмника;

- зеркальное отражение от оптических поверхностей приёмного объектива;
- диффузное отражение в оптическом тракте между приёмным объективом и фотоприёмником.

Из этих переотражений сравнительно легко учитываются только зеркальные отражения от защитного стекла фотоприёмника и от оптических поверхностей объектива. Смешанное отражение от элементов конструкции фотоприёмника и диффузное отражение в оптическом тракте практически не поддаются учёту из-за необходимости точного моделирования конструкции и катастрофического увеличения количества трассируемых лучей. По тем же причинам практически невозможно учесть переотражения между корпусом оптоэлектронной системы и объектом, оказывающие большое влияние на дистанционную характеристику в области сверхмалых расстояний.

Для расчёта дистанционной характеристики описываемым методом автором разработана программа на языке C++. Программа учитывает изменение размера освещённой поверхности в зависимости от угла падения излучения [2]. Расчёт дистанционной характеристики делится на следующие этапы:

1. *Расчёт зондирующего пучка.* На данном этапе тело свечения излучателя дискретизируется по двум линейным координатам X и Y (20 точек по каждой координате). Каждая точка является источником лучей по двум угловым координатам α и β (600 лучей по каждой координате). Энергетический вклад каждого луча прямо пропорционален мощности излучателя и гауссову распределению интенсивности и обратно пропорционален общему количеству лучей. Для каждого из 144 миллионов лучей рассчитывается прохождение через передающий объектив в приближении геометрической оптики [6].

2. *Создание массива карт освещённости отражающего объекта зондирующим пучком для каждого из рассчитываемых расстояний до объекта.* На данном этапе каждый из лучей, рассчитанных на предыдущем этапе, трассируется через пространство на определённое расстояние. Затем гистограммным методом строится карта освещённости отражающего объекта. Процесс повторяется для остальных рассчитываемых расстояний до объекта. Карта освещённости строится в угловых координатах для сохранения её размера на различных расстояниях до объекта.

3. *Трассировка лучей через приёмный объектив.* Каждая ячейка карты освещённости (элементарная отражающая поверхность) является источником лучей по двум угловым координатам α_1 и β_1 . Количество лучей по каждой координате зависит от расстояния до отражающей поверхности и выбирается таким образом, чтобы на входной зрачок приёмного объектива попадало ~ 8000 лучей. Энергетический вклад каждого луча прямо пропорционален освещённости ячейки карты и обратно пропорционален общему количеству лучей. Для каждого луча рассчитывается прохождение через пространство и через приёмный объектив в приближении геометрической оптики.

4. *Трассировка зеркальных переотражений.* Каждая оптическая поверхность на пути луча делит луч на две компоненты: отражённую и преломлённую. До попадания луча на поверхность фотоприёмника переотражения не рассматриваются, так как отражённый луч направлен в противоположную от фотоприёмника сторону, а учитывается только уменьшение энергии луча. После отражения от поверхности фотоприёмника исследуются четыре компоненты луча, отразившиеся от оптических поверхностей: по одной на каждую грань защитного стекла и на каждую поверхность однолинзового приёмного объектива. При каждом отражении уменьшается энергетический вклад луча в соответствии с коэффициентом зеркального отражения каждой поверхности, многократные переотражения не учитываются. Коэффициент зеркального отражения R_3 находится по формулам Френеля [6]. При нормальном падении луча на поверхность коэффициент R_3 вычисляется по формуле $R_3 = |(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)|^2$, где n_1, n_2 — показатели преломления первой и второй оптических поверхностей.

Для используемых в расчёте оптических поверхностей с учётом их показателя преломления $R_3 \approx 0,4$ для кремниевой фоточувствительной площадки фотоприёмника, $R_3 \approx 0,05$ для непросветлённой и $R_3 \approx 0,005$ для просветлённой поверхностей стекла.

5. *Вычисление мощности оптического сигнала, падающей на каждый светочувствительный элемент фотоприёмника.* На этом этапе гистограммным методом строится карта освещённости фокальной плоскости приёмного объектива. Ячейки карты освещённости по своим размерам и местоположению соответствуют фоточувствительным элементам фотоприёмника. Таким образом, освещённость ячейки карты пропорциональна сигналу с фоточувствительной площадки фотоприёмника.

Этапы 3–5 повторяются для каждого из рассчитываемых расстояний до объекта.

Результаты расчёта приведены на рис. 1, с. Из рисунка видно, что мёртвая зона практически отсутствует, хотя сигнал в ближней зоне меньше экспериментального. Расчётная амплитуда максимума U_{r1} примерно в 3,8 раза больше экспериментальной.

В ходе дальнейшего анализа было выяснено, что вклад зеркального отражения от оптических поверхностей приёмного объектива очень мал и составляет 0,5–2 % от вклада зеркального отражения от защитного стекла фотоприёмника. Основное количество лучей, переотражённых от оптических поверхностей приёмного объектива, попадает на внутренние поверхности оптического тракта и, диффузно отражаясь, в том числе на светочувствительные элементы фотоприёмника.

Для компенсации влияния этих малоизученных переотражений в инженерных расчётах можно использовать следующий подход: к энергетическому вкладу лучей, переотражённых от защитного стекла фотоприёмника, применять эмпирический коэффициент, а суммарный сигнал ослаблять для компенсации увеличения сигнала в дальней зоне. Оптимальное значение коэффициента подбирается экспериментально для фотоприёмников, материалов и геометрии оптического тракта. Излишнее увеличение этого коэффициента приводит к снижению точности расчётов в дальней зоне, что может оказать влияние на результаты расчёта точностных характеристик оптоэлектронных систем, обладающих малым базовым расстоянием и использующих метод равносигнальной зоны. Исходя из согласования расчётных дистанционных характеристик с экспериментальными, с определённой долей вероятности эмпирический коэффициент был взят равным 10 (рис. 1, d).

Подтверждение методики. Для подтверждения выбора эмпирического коэффициента была рассчитана дистанционная характеристика оптоэлектронной системы с дру-

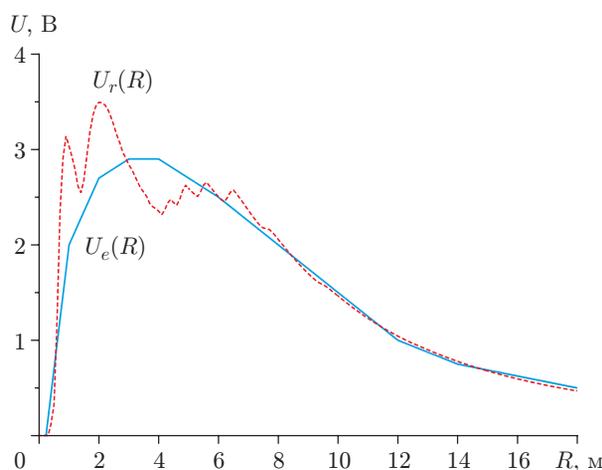


Рис. 2. Сравнение экспериментальной $U_e(R)$ и расчётной $U_r(R)$ дистанционных характеристик

гими конструктивными параметрами, оптической схемой, типами излучателя и фотоприёмника, особенностью которого является малая ширина фоточувствительного элемента (0,19 мм). На рис. 2 приведены расчётная и экспериментальная дистанционные характеристики. Сравнение проводилось в диапазоне расстояний от 0 до 18 м. Отметим хорошую сходимость результатов. С учётом этого эмпирический коэффициент равный 10 можно использовать для дальнейших расчётов с последующим его уточнением по мере набора статистики. Также отмечается, что для данной оптоэлектронной системы, как и для предыдущей, классические методы моделирования показывают меньшую точность в ближней зоне.

Заключение. Предлагаемая методика расчёта дистанционной характеристики оптоэлектронной системы, основанная на трассировке хода лучей и анализе переотражений излучения в фотоприёмном тракте, даёт приемлемые для инженерных расчётов результаты с достаточно высокой точностью.

Точность расчёта ближней зоны дистанционной характеристики с помощью этой методики выше, чем у существующих методик.

К недостаткам рассматриваемой методики можно отнести длительное время расчёта, связанное с большим количеством трассируемых лучей. Снижение количества лучей нежелательно, так как приведёт к появлению погрешности дискретизации. Сокращение времени расчёта возможно за счёт использования параллельных вычислений.

Такая методика может служить основой для построения модели оптоэлектронной системы, учитывающей помеховые и фоноцелевые факторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лёгкий В. Н., Топорков В. Д.** Лазерные системы ближней локации: оптоэлектронные датчики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 152 с.
2. **Мусьяков М. П., Миценко И. Д.** Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. М.: Радио и связь, 1991. 168 с.
3. **Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванеев Г. Г.** Проблемы ближней лазерной локации. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 295 с.
4. **Батурин А. Г.** Применение амплитудно-базового метода обнаружения в оптоэлектронных датчиках // Сб. матер. X Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2014». Новосибирск, 2014. Т. 2. С. 223–227.
5. **Битюков В. К., Меньшикова Л. В., Петров В. А.** Спектральная и температурная зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения кремния // Тр. 10-й Международ. науч. конф. и школы-семинара «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники (ПЭМ-2006)». Таганрог: ТРГУ, 2006. Ч. 1. С. 63–66.
6. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики: Пер. с англ. М.: Наука, 1973. 720 с.

Поступила в редакцию 3 декабря 2014 г.