

ТРУДЫ

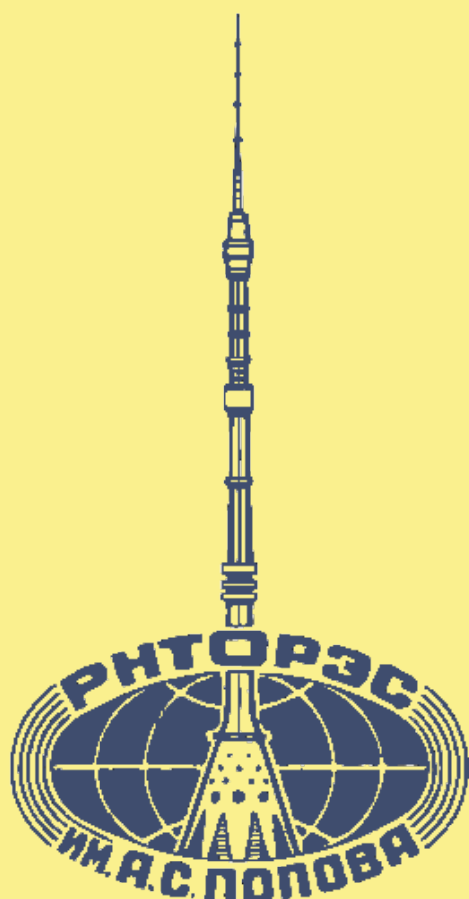
Российского научно-технического
общества радиотехники, электроники
и связи имени А.С. Попова

Серия: АКУСТООПТИЧЕСКИЕ
И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Выпуск: XVIII

**Акустооптические и радиолокационные методы
измерений и обработки информации: Труды XVIII
Международной научно-технической конференции**

Суздаль, 15-18 сентября 2025



Москва, 2025

УДК [621.396.96+528.8](082)

ББК 32.844+23.12

A44

ISBN 978-5-6051133-7-9

Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации:
Труды XVII Международной научно-технической конференции, Суздаль, 15–18 сентября 2025.
ISBN 978-5-6051133-7-9. М.: НТЦ УП РАН, 2025.

Под общей редакцией:

д.ф.-м.н. Пожар В.Э., д.т.н. Мачихин А.С.

ОРГАНИЗАТОРЫ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН

СПОНСОРЫ

Группа компаний «Научное оборудование»

ЗАО «СЛС Прайм Технолоджи»

Компания «EKSLi»

ПРОГРАММНЫЙ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Кравченко В.Ф.

к.ф.-м.н. Анциперов В.Е., д.т.н. Афанасьев М.С., к.т.н. Батшев В.И., академик НАН Беларуси
Белый В.Н., д.б.н. Бурлаков А.Б., к.т.н. Гурылева А.В., к.ф.-м.н. Данилычев М.В. (Россия),
д.т.н. Дунаев А.В., к.ф.-м.н. Ершов Е.И. (Россия), д.ф.-м.н. Зайцев К.И., к.ф.-м.н. Зинин П.В.,
к.т.н. Казаков В.И., к.т.н. Кинжагулов И.Ю., д.ф.-м.н. Кутуза Б.Г., к.б.н. Ладан С.С.,
к.т.н. Марченков А.Ю., д.т.н. Мачихин А.С., д.т.н. Никитин А.К., к.ф.-м.н. Никитин П.А.,
д.ф.-м.н. Пожар В.Э., д.т.н. Титов С.А., член-корр. РАН Фёдоров М.В., к.ф.-м.н. Хасанов И.Ш.,
к.ф.-м.н. Чуриков Д.В.

Конференция приурочена к проведению

Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации.



ARMIMP-2025

<http://armimp.ru>

Авторы несут персональную ответственность за содержание материалов, представленных в докладах

© Авторы докладов

© НТЦ УП РАН

© РНТОРЭС им. А.С. Попова

Апробация акустооптического колориметра в задаче порогового цветоразличения

Лобарев Г.Р.^{1,2}, Корчагин С.А.^{1,2}, Польщикова О.В.^{1,3}, Максимов П.В.¹, Ершов Е.И.^{1,2}

¹Институт проблем передачи информации РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Москва, Россия

³Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

SPIN-коды: —, —, 7447-5292, 8198-1140, 7397-9460

lobarev.gr@iitp.ru

Недостаток данных о восприятии человеком ярких и насыщенных цветов ограничивает точность современных моделей цветового различения, включая CIELAB, proLab и другие. Новый акустооптический колориметр (АОК) позволяет воспроизводить такие стимулы и собирать данные в ранее недоступных областях цветового пространства. Прибор обеспечивает управление спектром в широком диапазоне длин волн, но обладает аппаратными ограничениями, которые необходимо учитывать при задании параметров. В работе решена обратная задача выбора длин волн для воспроизведения целевого цвета с учётом этих ограничений. Для её решения разработан оптимизационный подход, минимизирующий цветовую ошибку. По сравнению с базовым методом перебора, он уменьшил среднюю ошибку на 0,04 по метрике ΔE_{00} . Эксперименты с насыщенными и ахроматическими стимулами показали воспроизводимую точность порядка 0,08 JND (Just Noticeable Difference), что подтверждает пригодность АОК для психофизических исследований порогов цветоразличения.

Ключевые слова: акустооптический колориметр, пороги цветового различения, цветовая репродукция

Введение

Современная наука о цвете опирается на трихроматическую теорию Юнга—Гельмгольца—Максвелла и сформулированные Грассманом законы цветового смешения, которые стали основой для построения моделей, описывающих восприятие цвета человеком, в частности линейного цветового пространства CIE XYZ [1]. Однако CIE XYZ оказалось перцептивно неоднородным: результаты экспериментов МакАдама по пороговому цветоразличению, в результате которых были определены эллипсы МакАдама – области на диаграмме цветности, которые содержат все цвета, неразличимые среднестатистическим человеческим глазом от цветов в центре эллипса, показали, что пороговое различие цветов, едва заметное человеку (JND – Just Noticeable Difference), сильно зависит от их положения в цветовом пространстве. Такая неоднородность ограничивает использование стандартных моделей для оценки перцептивного расстояния между цветами и точной репродукции. Более поздние модели (CIELAB [2], proLab [3], ΔE_{00} [4] и др.) создавались с целью устранить эти искажения, однако отсутствие психофизических экспериментов для высоконасыщенных и ярких цветовых стимулов оставляет открытым вопрос достоверности данных моделей в соответствующих областях цветового пространства. Современные системы предъявления цвета часто не обеспечивают достаточную монохроматичность и яркость стимулов, что ограничивает возможности синтеза цветов вне стандартного гамута sRGB (Standard Red Green Blue) [5].

Акустооптический колориметр (АОК) [6], разработанный в НТЦ УП РАН, позволяет управлять узкополосными спектрами и воспроизводить почти любой цвет с заданной цветностью и яркостью. Он создаёт новую платформу для измерения порогов цветоразличения и уточнения метрических моделей, однако его математическое обеспечение

всё ещё находится в разработке. Данная работа продолжает результаты [7] по решению прямой и обратной задачи для точной репродукции цвета. Прямая задача сводится к моделированию воспроизводимого цвета по параметрам колориметра, обратная — к их определению по заданному цвету с учётом физических ограничений и дискретности управления. Точность решения обратной задачи оценивается на основе калибровочных данных прямой задачи для насыщенных и ахроматических цветов. В [7] прямая задача решалась получением калибровочных данных на сетке параметров и последующей интерполяцией. Основная сложность обратной задачи заключается в репродукции цвета из пространства CIE XYZ [1], где координаты (x, y) описывают цветность, а Y [кд/м²] — яркость. Для воспроизведения любого цвета в пространстве нормального наблюдателя теоретически достаточно двух длин волн, но один и тот же цвет можно получить разными их комбинациями. Для психофизических экспериментов требуется воспроизведение не только заданного цвета, но и его окрестности, что делает необходимым использование как минимум трёх длин волн. Наличие множества их комбинаций, приводящих к одному и тому же цвету, отражает явление метамеризма.

Корректный выбор длин волн для репродукции цвета и его окрестности и оценка точности решения обратной задачи и являются целью данной работы.

1. Методы и решение

Описание колориметра. АОК синтезирует цветовые стимулы за счёт управления узкополосными компонентами широкополосного источника освещения с помощью акустооптической дифракции. На перестраиваемый акустооптический фильтр (АОФ) передаются параметры частоты и мощности управляющего сигнала f_i [МГц], P_i [Вт] или (%), определяющие спектр дифрагированного излучения. Колориметр обеспечивает независимое управление четырьмя каналами, то есть перестройку четырех квазимонохроматических каналов в видимом спектре, что делает его инструментом для воспроизведения насыщенных цветов, недоступных стандартным дисплеям.

Ограничения. У колориметра есть ряд ограничений, которые необходимо учитывать при репродукции цвета. Значения f_i, P_i задаются дискретно с шагами $\Delta f = 0,01$ МГц и $\Delta P = 0,1$ %. Частоты не выходят за ограничения $f_{min} \leq f_i \leq f_{max}$, мощность не превышает максимальной дифракционной эффективности ячейки: $P_i \leq P_{max}$, максимальная суммарная электрическая мощность не превышает предела $\sum_{i=1}^n P_i^{электрическая} \leq 3,5$ Вт. Всё это накладывает нетривиальные ограничения на задаваемые акустические параметры f_i, P_i .

Оценка ошибки. В [7] получена ошибка воспроизведения, вызванная дискретностью параметров: $\Delta x(P, f) = \frac{\partial x(P, f)}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial x(P, f)}{\partial f} \Delta f$, $\Delta y(P, f) = \frac{\partial y(P, f)}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial y(P, f)}{\partial f} \Delta f$, где x, y — координаты цветности стимула, которые зависят от задаваемого набора параметров мощностей P и частот f . Вычисления производных в формуле сделаны на основе модели спектральной функции пропускания АОФ, учитывающей конечную ширину $\Delta\lambda$ и форму спектра, и моделей калибровочных кривых.

Обратная задача. С целью выбора набора длин волн для требуемого цвета предлагается поставить задачу оптимизации, где функционалом для минимизации выступает цветовая метрика ΔE_{00} между целевым цветом (x, y) и цветом, смещённым на ошибку по формуле выше $(x \pm \Delta x, y \pm \Delta y)$, вызванной дискретностью параметров колориметра. Такой подход позволяет минимизировать ошибку задания цвета, возникающую из-за дискретности задаваемых программно акустических параметров f_i и P_i . В качестве ограничений оптимизационной задачи используются ограничения колориметра, указанные выше. Оптимизация производится на наборе 8 точек вокруг целевой точки на расстоянии 2 JND (Just Noticeable Difference) по ΔE_{00} для учёта возможности воспроизведения пороговых цветовых стимулов без смены базовых длин волн, чего требуют условия эксперимента. Для

решения оптимизационной задачи использован метод SLSQP (Sequential Least Squares Programming).

Задача по проверке точности воспроизведения цветов и сравнение с базовым методом. Перед использованием АОК в психофизических экспериментах необходимо убедиться в теоретической точности репродукции цветов, то есть решении обратной задачи оптимизационным подходом. Для сравнения выбран наивный подход полного перебора по длинам волн. Большое количество итераций алгоритма до нахождения длин волн, удовлетворяющих ограничениям, и неучёт дискретности параметров относится к его минусам. К плюсам метода можно отнести простоту реализации.

Решение описанных задач позволяет использовать АОК как высокоточный инструмент для репродукции цвета и построения новых данных по пороговому цветоразличению, особенно в слабо исследованных насыщенных зонах, и для уточнения современных цветовых моделей.

2. Эксперименты и результаты оптимизации

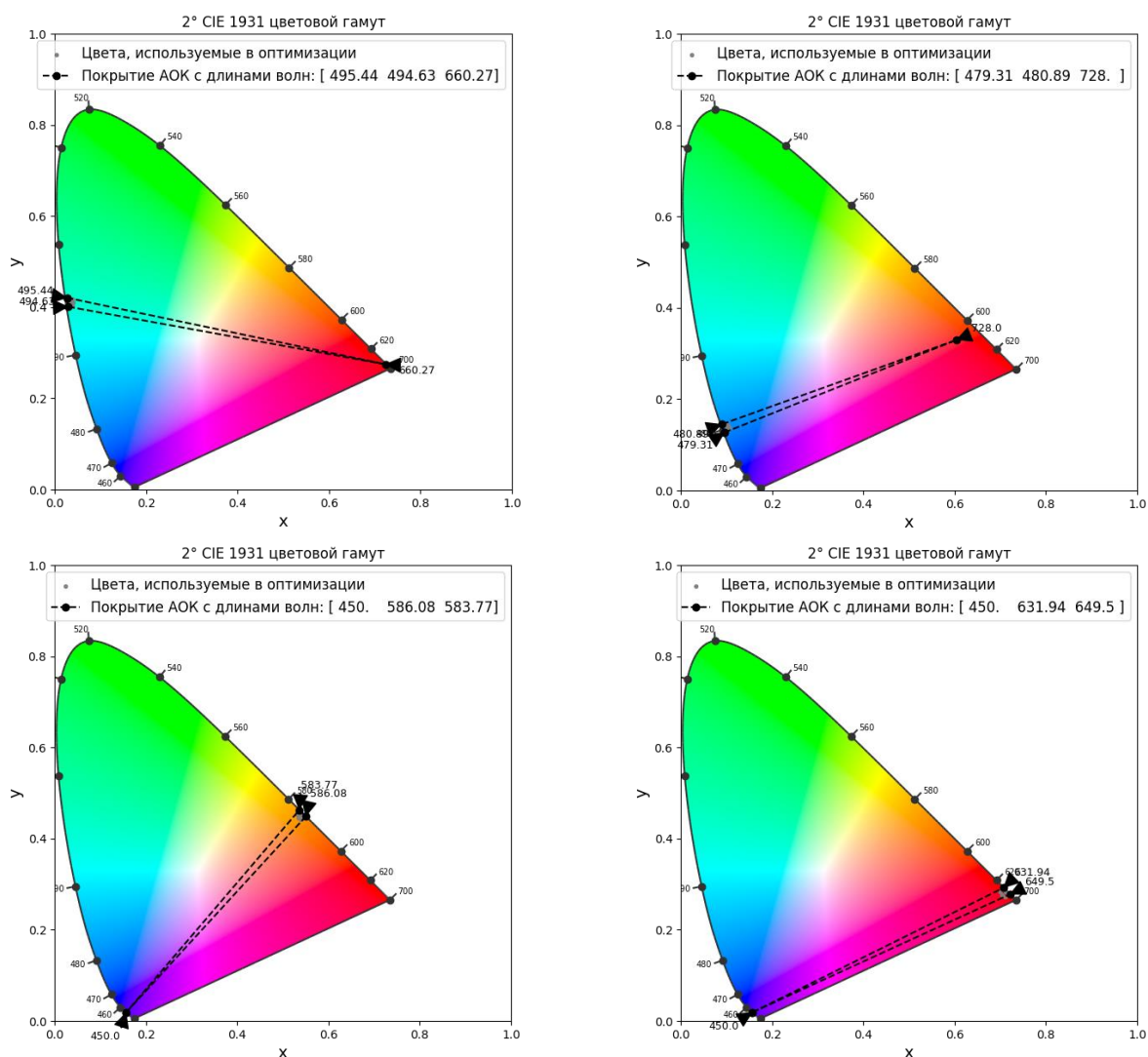


Рис. 1. Пример работы алгоритма оптимизации для выбора длин волн. Серые точки – целевые стимулы и их окрестности в виде эллипса точек на расстоянии 2 JND по ΔE_{00} . Пунктирной линией показан охват, формируемый выбранными базовыми длинами волн.

Для проверки работы предложенного оптимизационного подхода для выбора длин волн с целью синтеза цвета в АОК была проведена серия экспериментов на наборе высоконасыщенных и ахроматических стимулов с яркостью $Y = 50 \text{ кд/м}^2$ и 8 точек вокруг

них. На рис. 1 представлен пример работы алгоритма оптимизации для выбора базовых длин волн.

Сравнение. Оптимизационный метод выбора длин волн сравнивается с перебором. В качестве целевых точек был взят набор из 68 высоконасыщенных точек на расстоянии 0,01 от цветового локуса в цветовых координатах CIE xY 1931 и 4 ахроматических стимула. Значение ошибки получается следующим образом: для данных длин волн рассчитываются интенсивности, с которыми следует сложить спектральные каналы. С помощью этих интенсивностей рассчитывается получаемый цвет на основе данных калибровки колориметра. Результаты сравнения представлены в табл. 1. Максимальная ошибка после оптимизации не превысила $\Delta E_{00} = 0,09$, что ниже порога цветового различения согласно данной цветовой метрике, подтверждая пригодность АОК для психофизических экспериментов.

Табл. 1. Результаты оптимизации цветовой репродукции в JND по CIEDE2000

| Диапазон цветов | Среднее ΔE_{00} , перебор | Среднее ΔE_{00} , оптимизация | Улучшение |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------|
| Ахроматические точки (4 точки) | 0,12 JND | 0,08 JND | 0,04 JND |
| Насыщенные красные (23 точки) | 0,15 JND | 0,09 JND | 0,06 JND |
| Насыщенные синие (10 точек) | 0,08 JND | 0,06 JND | 0,02 JND |
| Насыщенные зелёные (35 точек) | 0,11 JND | 0,08 JND | 0,03 JND |

3. Анализ результатов

Результаты решения обратной задачи подтверждают эффективность предложенного подхода к репродукции цвета в АОК. Алгоритм автоматически выбирает длины волн, близкие к целевому стимулу, особенно в насыщенных областях, где чувствительность цветовых функций максимальна. Это позволяет минимизировать вклад ошибки, обусловленный дискретностью управления частотой и мощностью.

Предложенный подход на основе метода SLSQP полностью учитывает все физические ограничения АОК, благодаря чему найденные решения являются не только оптимальными с точки зрения минимизации цветовой ошибки, но и аппаратно реализуемыми. Это исключает ситуацию, когда теоретически рассчитанный цвет невозможно воспроизвести на практике.

Кроме того, минимизация цветовой ошибки в метрике ΔE_{00} позволяет учитывать перцептивную неоднородность цветового пространства, что особенно важно для насыщенных цветов. В результате достигнута высокая точность: максимальная ошибка составила $\Delta E_{00} < 0,09$, что существенно ниже порога цветового различения ($JND = 1$).

Таким образом, комбинация аналитической оценки ошибки и численной оптимизации параметров не только обеспечивает соблюдение всех технических ограничений, но и повышает точность репродукции цвета, делая АОК надёжным инструментом для проведения высокоточных психофизических экспериментов.

Выводы

1. Оптимизационный подход показал работоспособность в насыщенных областях цветового пространства, обеспечивая точное воспроизведение цветовых стимулов, критически важных для психофизических экспериментов.

2. Воспроизведение цветового стимула с выбранными базовыми длинами волн гарантируется благодаря оптимизационному подходу, учитывающему физические ограничения колориметра — диапазон частот, мощности, соответствующие максимальной дифракционной эффективности, и суммарную электрическую мощность.

3. Применение оптимизации позволило снизить ошибку воспроизведения цветового стимула по метрике ΔE_{00} в среднем на 0,04.

Полученные результаты позволяют правильно выбрать длины волн для репродукции цвета и теоретически подтверждают пригодность АОК для проведения высокоточных психофизических экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFNU-2025-0045 ИППИ РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Список литературы

1. Smith T., Guild J. The C.I.E. colorimetric standards and their use // Transactions of the Optical Society. 1931. V. 33. № 3. P. 73–134.
2. McLaren K. The development of the CIE 1976 ($L^* a^* b^*$) uniform colour space and colour-difference formula // Journal of the Society of Dyers and Colourists. 1976. V. 92. № 9. P. 338–341.
3. Коноваленко И.А., Смагина А.А., Николаев Д.П., Николаев П.П. ProLab: психофизически равномерная проективная система цветовых координат // PREPRINTS.RU. 2020. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112064>
4. Luo M.R., Cui G., Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 // Color Research & Application. 2001. V. 26. № 5. P. 340–350.
5. IEC 61966-2-1:1999. Оборудование и системы мультимедиа — Измерение и управление цветом. Часть 2-1: Управление цветом — Унифицированное цветовое пространство RGB — sRGB : междунар. стандарт. Издание 1. Женева: Междунар. электротехн. комис., 1999. 17 с.
6. Machikhin A., Beliaeva A., Romanova G., Ershov E. Color Reproduction by Multi-Wavelength Bragg Diffraction of White Light // Materials. 2023. V. 16. P. 4382.
7. Лобарев Г.Р. Апробация акустооптического колориметра для оценки порогов цветового различения: Дипломная работа. Московский физико-технический институт. Москва, 2025. 43 с.

Testing of an acousto-optic colorimeter for the task of threshold color discrimination

Lobarev G.R.^{1,2}, Korchagin S.A.^{1,2}, Polschikova O.V.^{1,3}, Maximov P.V.¹, Ershov E.I.^{1,2}

¹Institute for Information Transmission Problems of RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

³Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow, Russia
lobarev.gr@iitp.ru

The lack of data on human perception of bright and highly saturated colors limits the accuracy of modern color difference models, including CIELAB, proLab, and others. A new acousto-optic colorimeter (AOC) makes it possible to reproduce such stimuli and collect data in previously unexplored regions of color space. The device provides spectral control over a wide range of wavelengths but is subject to hardware constraints that must be considered when setting its parameters. This work addresses the inverse problem of selecting wavelengths for reproducing a target color under these constraints. An optimization approach was developed to minimize color error. Compared to a baseline brute-force method, it reduced the average error by 0.04 ΔE_{00} . Experiments with saturated and achromatic stimuli demonstrated a reproducible accuracy of about 0.08 JND, confirming the suitability of the AOC for psychophysical studies of color discrimination thresholds.

Keywords: acousto-optic colorimeter, thresholds of color discrimination, color reproduction