

Многоспектральный оптический метод формирования и обработки изображений низкоконтрастных подкожных образований при априорной неопределенности параметров кожи

В настоящее время при обнаружении оптической системой низкоконтрастных объектов через рассеивающей среды применяются следующие методы и способы фильтрации изображений: импульсная лазерная подсветка с временным стробированием отраженного сигнала [1], нерезкого маскирования, гомоморфной и адаптивной фильтрации [2-5]. Также известны способы коррекции искаженных атмосферой изображений, в том числе многоспектральные, использующие различного рода априорные сведения [6,7]. Общим недостатком существующих систем является то, что они не учитывают влияние неоднородности характеристик рассеивающей среды, что ограничивает их применение и может приводить к наблюдению ложных образований.

Многоспектральный метод восстановления изображений [8,9] основан на свойстве спектральной прозрачности рассеивающей среды в приближении однократного рассеяния. Наиболее важным параметром характеризующим ослабление света в среде за счёт его поглощения и рассеяния является оптическая толщина $\tau(\lambda)$, величина которой зависит от спектральной прозрачности и толщины среды. Многоспектральный метод использует зависимость оптической толщины $\tau(\lambda)$ от длины волны и поэтому может работать при резких пространственных колебаниях плотности искажающей рассеивающей среды.

Реализация многоспектрального метода при обнаружении низкоконтрастных подкожных образований затруднена тем, что необходимо знать значение величины $d = \tau(\lambda_2) / \tau(\lambda_1)$ для каждой точки поверхности кожи.

В статье рассматривается возможность реализации многоспектрального метода позволяющего произвести обработку без соблюдения жестких требований к точности выбора длин волн, на которых формируются изображения и, соответственно, обеспечения заданного значения отношения значений оптических толщ кожи.

Рассмотрим особенности реализации многоспектрального метода.

Обследуемый подкожный участок, характеризуемый коэффициентами отражения $C(x, y, \lambda)$ подсвечивается одновременно лазерными (светодиодными) лучами на двух длинах волн λ_1 и λ_2 . Изображение подсвечиваемого участка поверхности воспринимается двумя матрицами фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) для λ_1 и λ_2 , причем каждый элемент матриц воспринимает изображение определенного элемента подсвечиваемого участка.

Для определения заряда $q(x, y, \lambda)$, накопленного в ячейке ФПЗС при наблюдении объекта через рассеивающие среды (кожу), расположенного в непосредственной близости к рассеивающей среде, воспользуемся следующим выражением [1]:

$$q(x, y, \lambda) = \frac{Q \cdot t_n \cdot \Phi_0 \cdot D^2}{4 \cdot R^2} \cdot [C(x, y) \cdot e^{-2\tau(x, y, \lambda)} + 1 - e^{-\tau(x, y, \lambda)}],$$

где Q - чувствительность ячейки, зависящая в основном от коэффициента пропускания многослойного покрытия, квантового выхода, внутреннего фотоэффекта и коэффициента поглощения полупроводниковой подложки;

Φ_0 - световой поток, излучаемый квантовым генератором на элемент участка поверхности,

t_n - время накопления,

D - диаметр объектива фотоприемника,

R - расстояние от точки визирования до фотоприемника,

$\tau(x, y, \lambda)$ - оптическая толщина рассеивающей среды,

$C(x, y)$ - безразмерный коэффициент, характеризующий отражательную способность и рельеф объекта [10].

Так как $\frac{Q \cdot t_n \cdot \Phi_0 \cdot D^2}{4 \cdot R^2}$ величина постоянна, то ее можно обозначить через m .

$$\text{Получим } q(x, y, \lambda) = m \cdot [C(x, y) \cdot e^{-2\tau(x, y, \lambda)} + 1 - e^{-\tau(x, y, \lambda)}], (1)$$

Для решения данной задачи составим систему уравнений при $\tau(x, y, \lambda_2) = d \cdot \tau(x, y, \lambda_1)$, где d - постоянный коэффициент, принимающий значения от 1 до 2,

$$\begin{cases} q_1(x, y, \lambda_1) = m \cdot [C(x, y) \cdot e^{-2\tau(x, y, \lambda_1)} + 1 - e^{-\tau(x, y, \lambda_1)}] \\ q_2(x, y, \lambda_2) = m \cdot [C(x, y) \cdot e^{-2\tau(x, y, \lambda_2)} + 1 - e^{-\tau(x, y, \lambda_2)}] \end{cases}, (2)$$

Для дальнейшего анализа введем упрощенную систему обозначений

$$a = (q_1(x, y, \lambda_1) - m) / m, b = (q_2(x, y, \lambda_2) - m) / m, z = \tau(x, y, \lambda_1), C = C(x, y),$$

Тогда система (2) примет вид

$$\begin{cases} a = C \cdot e^{-2z} - e^{-z} \\ b = C \cdot e^{-2z \cdot d} - e^{-z \cdot d} \end{cases}, (3)$$

Аналитическое решение системы (3) возможно при $d=2$,

В этом случае оценочные значения C^* и z^* рассчитывались по следующим формулам:

$$C^* = \frac{1}{4} \cdot \frac{\left[-1 + \left[\frac{a}{3b} \cdot h + 4 \cdot a \cdot \frac{(a-1)^2}{h} \right]^2 \right]}{a}, (4)$$

$$\text{где } h = \left[\left[-108 + 12 \cdot \left[\frac{- \left[12 \cdot a^{\frac{1}{3}} - 36 \cdot a^{\frac{1}{2}} + 36 \cdot a - 12 - 81 \cdot b \right]^{\frac{1}{2}}}{b} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot b^2 \right], (5)$$

$$z^* = -\ln \frac{1}{(2 \cdot C^*)} \cdot \left[1 - (1 + 4 \cdot C^* \cdot a)^{\frac{1}{2}} \right], (6)$$

Рассмотренный метод предполагает наличие априорных данных о взаимосвязи оптических толщ кожи на λ_1 и λ_2 что при обнаружении подкожных образований является затруднительным.

Поэтому необходимо произвести предварительную оценку значения оптической толщи в разных точках обследуемого участка. Для этого исключим из анализа значение коэффициент отражения C . В первом уравнении системы (3) примем, что $C = 0,5$. Тогда получим оценку значения z оптической толщи:

$$zp = -\ln(-\sqrt{2 \cdot a + 1} - 1). \quad (7)$$

Оценка значения оптической толщи будет наиболее сильно отличаться от реального значения при C равным 0 или 1. Оценим погрешность определения оптической толщи по выражению (7). Для этого при заданных значениях C и z по первому уравнению системы (3) рассчитывается значение a и подставляется в выражение (7), полученный результат сравним с заданным значением z . Погрешность оценки значения оптической толщи оказалась одинаковой для случаев, когда C равного 0 и 1 (рисунок 1).

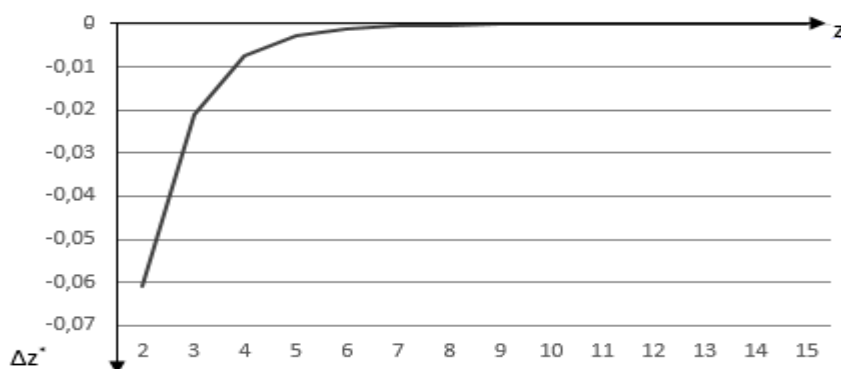


Рисунок 1 - Погрешность оценки значения оптической толщи

Из представленной зависимости видно, что погрешность оценки не превышает 7%. Данная погрешность ΔZ^* оценки оптической толщи высока для правильного определения значений коэффициентов отражения, но

достаточна для того, чтобы разбить обследуемый участок на участки с одинаковыми оптическими толщами.

Кроме того, выражение (7) можно будет использовать в дальнейшем для получения оценочного значения коэффициента d .

Введем понятие функция расстройки (ФР). ФР определяет зависимость результата оценки значения оптической толщи Z^* в результате решения системы (3) при несоблюдении требования $d=d_0$, где d_0 – требуемое значение d . В случае расстройки будем задавать значение

$$d = d_0 + k, \quad (8)$$

где k - коэффициент расстройки, принимающий значение от -0,9 до 1.

Введение расстройки приводит к нарушению условий, при которых справедливо выражение (4) и появлению комплексных значений C^* . Проведенные исследования показали, что для устранения данных ошибок достаточно взять $C^* = |C^*|$.

Рассмотрим поведение ФР.

Для чего при заданных значениях Z и C по выражениям системы (3) рассчитаем значения a и b , с учетом коэффициента расстройки, и подставим в выражения (4-6).

На рисунке 2 представлена зависимость результата вычисления z^* при изменении коэффициента расстройки при заданных значениях $d_0=2$, $z=1,5;3;4,5;6$.

Анализ полученных зависимостей привел к выводу о прямой связи угла наклона возрастающей части линий со значением z для λ_1 .

Используем этот участок функции для вычисления значения C . Значения первой производной возрастающего участка постоянны, что свидетельствует о линейности функции расстройки.

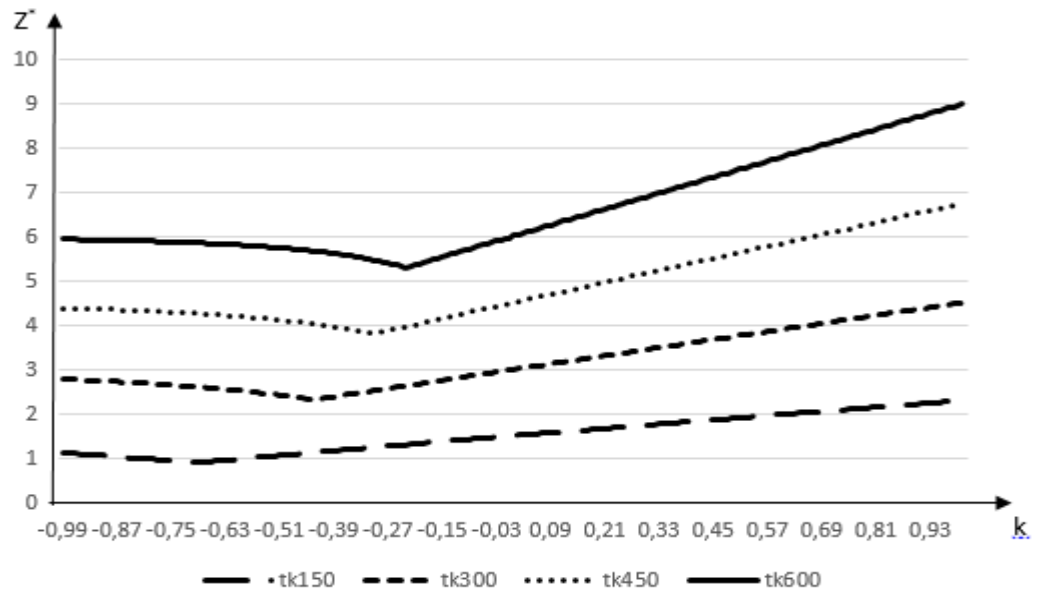


Рисунок 2 –Функция расстройки tk150, tk300, tk450, tk600 соответственно при заданных значениях $z=1,5;3;4,5;6$.

Сформируем изображения на четырех длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Причем значение λ_2 подбирается с использованием выражения (7) таким образом, чтобы значение d было ≥ 2 (что соответствует значению $k \geq 0$), а значения $\lambda_3 = 0.92 \cdot \lambda_2$ и $\lambda_4 = 0.85 \cdot \lambda_2$. Для каждой точки двух изображений, полученных соответственно на λ_1 и λ_2 , λ_1 и λ_3 , λ_1 и λ_4 . по выражению (6) вычисляются значения $z_{1,2}^*$, $z_{1,3}^*$ и $z_{1,4}^*$. В результате получаются три точки, располагающиеся на возрастающей линии ФР, при значениях коэффициентов расстройки $k_2 = k(\lambda_2)$, $k_3 = k(\lambda_3)$, и $k_4 = k(\lambda_4)$ (рисунок 3).

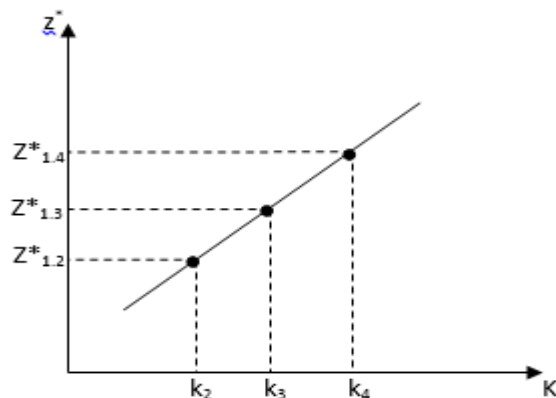


Рисунок 3 – Функция расстройки для дискретных значений λ

Для этих точек будет справедливо следующее равенство:

$$\frac{z_{1.3}^* - z_{1.2}^*}{z_{1.4}^* - z_{1.3}^*} = \frac{k_3 - k_2}{k_4 - k_3}. \quad (9)$$

Преобразуем отношение $\frac{k_3 - k_2}{k_4 - k_3}$ с учетом выражения (8). После преобразования получим $\frac{k_3 - k_2}{k_4 - k_3} = \frac{z_3 - z_2}{z_4 - z_3}$, где z_2, z_3, z_4 – значения z соответственно для $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$.

Используя совместно равенство (9) и первое уравнение системы (3) можно определить значение C . Рассчитаем значение левой части равенства (9). Зададим значение. $C=0,5$, вычислим значения z_2, z_3, z_4 , из первого уравнение системы(3)и проверим выполнение равенства (9). При невыполнении равенства задается другое значение. C и повторяются предыдущие действия. Методом перебора выбирается такое значение. C , при котором выполняется равенство (9).

Разработанный метод, реализуется в алгоритме, представленном на рисунке 4.

В алгоритме используются данные нескольких изображений $g_{l,i,j}$, где l – номер длины волны, на которой сформировано изображение; i,j – номер точки изображения, соответственно, по координатам x и y . На первом этапе обработки в циклах 1-3 для каждой точки изображений $g_{1,i,j} = \frac{[q_1(x,y,\lambda_1) - m]}{m}$, и $g_{2,i,j} = \frac{[q_2(x,y,\lambda_2) - m]}{m}$, производится подбор значения длины волны λ_2 . Начиная с $\lambda_2 = \lambda_n$ для точки 0,0 проверяется выполнение условия $d \geq 2$. При невыполнении условия значение λ_2 уменьшается, что приводит к увеличению значения d . Вводятся данные изображения, полученного на новой длине волны и снова проверяется условие и так до его выполнения. Для следующей точки изображения значение λ_2 не сбрасывается. Таким образом, выбирается такое значение λ_2 при котором условие $d \geq 2$ выполняется для каждой точки изображения. Рассчитываются значения λ_3 и λ_4 . Их значения выбираются так, чтобы значения оптических толщ возростали. Далее в цикле 6 для каждой точки изображений по уравнениям (4-6) находятся значения $z_{1,2}^* = z_{2,i,j}^*$, $z_{1,3}^* = z_{3,i,j}^*$, и $z_{1,4}^* = z_{4,i,j}^*$, и рассчитывается значение левой части равенства (9). В циклах 7-8 производится вычисление значения правой части равенства (9) при разных значениях. $C = cI$. Результатом являются значения, $C_{i,j}^*$, для которых выполняется равенство (9). Таким образом, разработаны многоспектральной метод и алгоритм его реализующий, позволяющие уменьшить искажающее влияние изменения характеристик кожи на формирование изображения. Использование функции расстройки позволяет произвести обработку без соблюдения жестких требований к точности выбора длин волн, на которых формируются изображения и, соответственно, обеспечения заданного значения отношения значений оптических толщ кожи $d = d_0$. Дальнейшее направление развития многоспектрального метода предполагается связать с

линеаризацией функции расстройки в сторону отрицательных значений расстройки и использования нелинейной части эти функции

Литература:

1. Карасик В.Е., Бокшанский В.Б. Управление временными режимами работы ЛСВ с импульсным подсветом // Приборы и системы управления. 1998. №3. С.85–87.
2. Стокхэм Д. Обработка изображений в контексте модели зрения // ТИИЭР. 1972. Т.60, №7. С.93 –107.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: пер с англ. М.: Мир, 1982. 480с.
4. Tamar, P. Adaptive filtering of image. Institution of Radioengineering / P. Tamar, J. Lim // IEEE Proceeding. 1981. Vol.1, №1-4.P.1–8.
5. A. J. LaRocca and R. E. Turner, "Atmospheric Transmittance and Radiance: Methods of Calculation," IRIA State-of-the-Art Report, ERIM 107600-10-T (Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, 1975); also available from NTIS as AD-A017 459.
6. Протасов К.Т., Белов В.В., Артамонов Е.С. Адаптивное восстановление космических снимков подстилающей поверхности Земли с использованием априорной информации // Вычислительные технологии. Т.5: Спец. выпуск. 2000. С.69 –81.
7. Муравьев И.В., Перцев Л.В., Исаенков Н.С. Обзор методов адаптивного использования спектра [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/468>, свободный. – Загл. с экрана– Яз. Рус.
8. Куликов А.Ю., Каверина Л.В., Строев В.М. Восстановление изображений, полученных активной телевизионной системой при работе в сложных метеоусловиях // Радиосистемы. 2003. Вып. 70, №6.С. 45-48.

9. Строев В.М., Альмас Г.Ф., Истомина А.И. Многоспектральный оптический метод обнаружения объектов через неоднородные среды//Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2013. №6. С.160-165.
10. Благородова Н.В., Замятин А.В., Сухомлинова В.В. Алгоритм расчёта отражений на основе геометрической модели [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона»,. 2012, №4 (часть 1). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1079>, свободный. – Загл. с экрана– Яз. Рус.