

# Metoda pomiaru minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatury w funkcji powiększenia i rozogniskowania kamery termowizyjnej

Sławomir Gogler, Krzysztof Sawicki, Andrzej Ligienza, Mariusz Mścichowski

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

**Streszczenie:** Pomiar temperatury odczynów alergicznych wymaga zapewnienia określonej rozdzielczości temperaturowej między obszarami o niewielkich wymiarach liniowych. Zwykle stosowanym kryterium rozdzielczości temperaturowej jest NETD. Parametr ten nie uwzględnia jednak przestrzennej zdolności rozdzielczej układu optycznego oraz detektora. W pracy zostanie zaprezentowany model umożliwiający określenie parametrów kamery na podstawie wymaganej przestrzennej rozdzielczości temperaturowej oraz wielkości obrazowanego obiektu. Zaimplementowana metoda została porównana z wynikami uzyskanymi w komercyjnym oprogramowaniu oraz została zastosowana do wyznaczania rozdzielczości temperaturowej prototypowego obiektywu pracującego w zakresie LWIR.

**Słowa kluczowe:** NETD, MRTD, głębia ostrości, rozdzielczość temperaturowa, rozdzielczość przestrzenna, termografia odczynów alergicznych, obrazowanie medyczne

## 1. Wprowadzenie

Parametr NETD (ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*) jest miarą rozdzielczości temperaturowej i jednocześnie powszechnie stosowaną przez producentów matryc i kamer termowizyjnych miarą jakości wytwarzanego przez nich urządzenia. W przypadku kamer termowizyjnych wartość parametru NETD może być mylnie interpretowana jako bezwzględna wartość rozdzielczości temperaturowej kamery. Standardowa procedura pomiaru parametru NETD polega na zarejestrowaniu promieniowania emitowanego z technicznego ciała czarnego dla dwóch różnych wartości temperatury (bądź części dwójki ciał czarnych o różnych wartościach temperatury promiennika). Parametr NETD najczęściej dotyczy średniej wartości wszystkich detektorów matrycy i wyznaczany jest wg zależności [1]:

$$NETD_{FPA} = \left\langle \frac{\sigma_{ij}}{R_{ij}} \right\rangle_{FPA}, \quad (1)$$

gdzie  $\sigma_{ij}$  jest wartością skuteczną szumu pojedynczego detektora,  $R_{ij}$  jest jego czułością napięciową.

### Autor korespondujący:

Sławomir Gogler, slawomir.gogler@wat.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 20.10.2023 r., przyjęty do druku 26.01.2024 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Procedura pomiarowa polega na rejestracji obrazu jednorodnej powierzchni i w związku z tym parametr ten nie zawiera informacji o przestrzennym rozkładzie pola temperaturowego w obrazie. Oznacza to, że parametr NETD odnosi się do czasowej rozdzielczości temperaturowej, gdy obrazowany przedmiot wypełnia całe pole widzenia, a jego temperatura zmienia się w czasie o pewną wartość. W rzeczywistości kamera służy do rejestrowania pola temperaturowego o pewnym poziomie szczegółowości i w związku z tym jej zdolność do rozróżnienia obszarów o niewielkich różnicach temperatury zależy od przestrzennej zdolności rozdzielczej kamery. Przestrzenna zdolność rozdzielcza opisywana jest najczęściej za pomocą tzw. zdolności do przenoszenia modulacji. W przypadku urządzenia termowizyjnego modulacja dotyczy wartości napromienienia w płaszczyźnie detektora, której odpowiada pewna różnica wartości temperatury w przestrzeni przedmiotowej układu. Zdolność urządzenia do przenoszenia kontrastu opisuje *MTF* (ang. *Modulation Transfer Function*). Jest to szczególnie istotne, w przypadku gdy istnieje konieczność zapewnienia odpowiedniej rozdzielczości temperaturowej pomiędzy niewielkimi szczegółami w obrazie.

W przypadku wojskowych kamer obserwacyjnych powszechnie stosowanym parametrem, który uwzględnia ograniczoną zdolność rozdzielczą kamery jest MRTD (ang. *Minimum Resolvable Temperature Difference*). Jest on stosowany m.in. do wyznaczania tzw. zasięgów DRI (ang. *Detection, Recognition, Identification*), gdy obserwowany przedmiot znajduje się „w nieskończoności”. W takim przypadku MRTD dotyczy tzw. standardowego celu NATO o wymiarach 2,3 m × 2,3 m i wyrażony jest w funkcji odległości od obserwatora, zgodnie z normą STANAG 4347 [2]. MRTD jest zatem miarą przestrzennej rozdzielczości temperaturowej.

Podczas obrazowania odczynów alergicznych, przedmiot (skóra pacjenta wraz z odczynami) znajduje się w stałej, skończonej

odległości. Oznacza to, że przedmiot obrazowany jest z pewnym powiększeniem poprzecznym. W takim przypadku rozdzielczość temperaturowa urządzenia jest funkcją tego powiększenia, jednak wraz ze wzrostem powiększenia maleje głębokość ostrości układu, co oznacza zwiększone wymagania co do dokładności położenia przedmiotu. Standardowe miary stosowane do definiowania głębi ostrości (np. kryterium Rayleigha lub Abbego) trudno jest odnieść do utraty przestrzennej rozdzielczości temperaturowej. W przypadku położenia przedmiotu poza płaszczyzną przedmiotową (rozogniskowania) następuje spadek wartości  $MTF$ , a w związku z tym spadek przestrzennej rozdzielczości temperaturowej.

## 2. Metoda pomiaru MRTD

Funkcja przenoszenia kontrastu zdefiniowana jest jako moduł optycznej funkcji przenoszenia  $OTF$  (ang. *Optical Transfer Function*) [3, 4], tzn.:

$$OTF(v_x, v_y) = MTF_0(v_x, v_y) \exp[iPTF(v_x, v_y)], \quad (2)$$

gdzie  $(v_x, v_y)$  są częstościami przestrzennymi w kierunkach  $(x, y)$ , natomiast  $OTF$  zdefiniowana jest jako transformata Fouriera rozkładu napromienienia obrazu źródła punktowego:

$$OTF(v_x, v_y, \lambda) = \mathcal{F}[PSF(x, y, \lambda)], \quad (3)$$

gdzie  $\lambda$  jest długością fali promieniowania.

W dalekim polu dyfrakcyjnym, zaburzenie optyczne  $U$  może być w przybliżeniu opisane przez transformatę Fouriera zespolonej funkcji źrenicy. Zgodnie z przybliżeniem Fraunhofera, dane jest ono zależnością:

$$U(x, y, \lambda) \propto \frac{1}{\lambda} \mathcal{F}[P(u, v, \lambda)], \quad (4)$$

gdzie  $P(u, v)$  jest zespoloną funkcją źrenicy wyjściowej układu:

$$P(u, v, \lambda) = |P(u, v)| \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} OPD(u, v, \lambda)\right]. \quad (5)$$

W przypadku braku apodyzacji (jednorodny rozkład amplitudy pola w źrenicy), dla źrenicy kołowej, moduł funkcji źrenicy ma postać:

$$|P(u, v)| = \begin{cases} 1 & \text{dla } \sqrt{u^2 + v^2} \leq \rho_m, \\ 0 & \text{dla } \sqrt{u^2 + v^2} > \rho_m, \end{cases} \quad (6)$$

$OPD(u, v)$  (ang. *Optical Path Difference*) jest funkcją opisującą aberracje układu optycznego w źrenicy wyjściowej układu (odchyleniem rzeczywistego frontu falowego od sferycznego frontu falowego) [5]. Rozkład napromienienia w przybliżeniu skalarnym dany jest wyrażeniem [3]:

$$PSF(x, y, \lambda) \propto |U(x, y, \lambda)|^2. \quad (7)$$

Powyższa zależność obowiązuje dla promieniowania monochromatycznego. W przypadku promieniowania szerokopasmowego, polichromatyczną  $PSF$  otrzymuje się przez całkowanie monochromatycznych  $PSF$  ważonych widmem mocy promieniowania [4]. Ponieważ w omawianym przypadku liczba widm jest skończona, to polichromatyczna  $PSF$  dana jest w tym przypadku wyrażeniem:

$$PSF(x, y, \Delta\lambda) = \sum_i c_i PSF(x, y, \lambda_i), \quad (8)$$

gdzie  $c_i$  jest względnym udziałem długości fali promieniowania  $\lambda_i$ . Oznacza to, że dla promieniowania szerokopasmowego konieczna jest znajomość charakterystyki widma transmisji układu oraz widma promieniowania źródła.

W przypadku detektora jego  $MTF$  dana jest za pomocą zależności [6]:

$$MTF_{det} = \left| \sin c \left( \frac{v}{v'_{od}} \right) \right|, \quad (9)$$

gdzie  $v'_{od}$  jest częstością przestrzenną odcięcia detektora równą:

$$v'_{od} = \frac{1}{d'}, \quad (10)$$

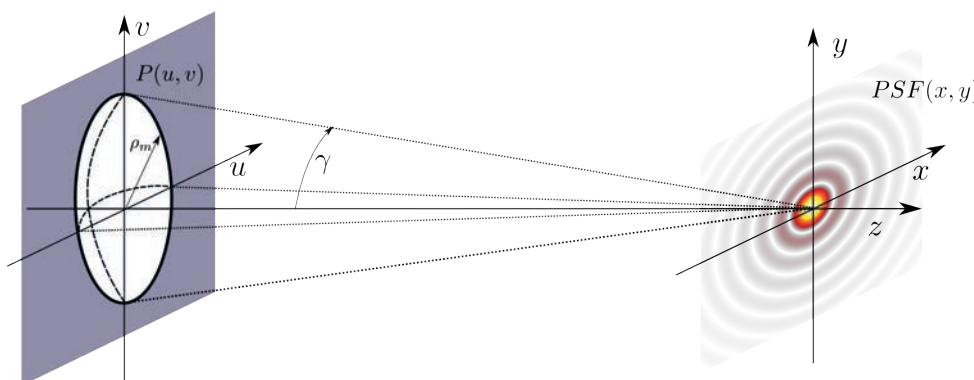
gdzie  $d'$  jest wymiarem pojedynczego detektora (piksela matrycy). Wielkości z indeksem górnym „prim” odnosić się będą do wielkości w przestrzeni obrazowej układu, wielkości bez tego symbolu należy rozumieć jako odnoszące się do przestrzeni przedmiotowej.

$MTF$  kamery jest iloczynem składowych  $MTF$  [6], jednak tylko  $MTF$  układu optycznego i detektora będzie dalej uwzględniana:

$$MTF_{sys} = MTF_0 \cdot MTF_{det} \quad (11)$$

Funkcja  $MRTD$  natomiast dana jest za pomocą równania:

$$MRTD(v_x, v_y, \Delta\lambda, OPD) = \frac{NETD}{MTF_{sys}(v_x, v_y, \Delta\lambda, OPD)}. \quad (12)$$



Rys. 1. Układy współrzędnych źrenicy wyjściowej  $(u, v)$  oraz płaszczyzny obrazowej  $(x, y)$  w opisie dyfrakcji na aperturze kołowej

Fig. 1. Exit pupil coordinates  $(u, v)$  and image plane coordinates  $(x, y)$  used in the description of diffraction at a circular aperture

Stosując powyższe zależności można przeprowadzić analizę wpływu aberracji układu optycznego na przestrzenną rozdzielczość temperaturową układu. W tej pracy analizowana będzie wyłącznie aberracja spowodowana rozogniskowaniem układu. Korzystając ze schematu przedstawionego na rys. 2, można pokazać, że dla niewielkich wartości rozogniskowania, aberracja falowa rozogniskowania może być przybliżona zależnością [7]:

$$OPD(u, v) = \delta'_z \{1 - \cos[\gamma(u, v)]\}, \quad (13)$$

gdzie  $\delta'_z$  jest wielkością rozogniskowania po stronie obrazowej układu. Wielkość rozogniskowania po stronie przedmiotowej, powstała na skutek rozogniskowania po stronie przedmiotowej, w ogólnym przypadku może zostać wyznaczona ze wzoru Kartezjusza:

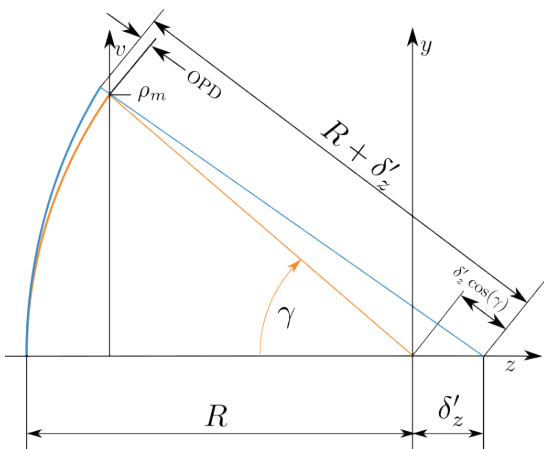
$$\delta'_z = f \left( \frac{s_0}{s_0 + f} - \frac{s_0 + \delta_z}{s_0 + \delta_z + f} \right), \quad (14)$$

gdzie  $f$  jest ogniskową układu. Odległość do przedmiotu  $s_0$  można obliczyć korzystając z powiększenia poprzecznego układu  $m$ :

$$s_0 = f \left( \frac{1}{m} - 1 \right). \quad (15)$$

Powyższe zależności pozwalają na powiązanie rozogniskowania po stronie przedmiotowej układu ze spadkiem wartości  $MTF$ , a w związku z tym, spadkiem rozdzielczości temperaturowej  $MRTD$  kamery.

$MTF$ , zgodnie z zależnością (3), jest funkcją częstotliwości przestrzennej po stronie obrazowej układu optycznego. Ponieważ zdolność rozdzielcza kamery jest funkcją zdolności rozdzielczej zarówno detektora, jak i układu optycznego, w niniejszej pracy

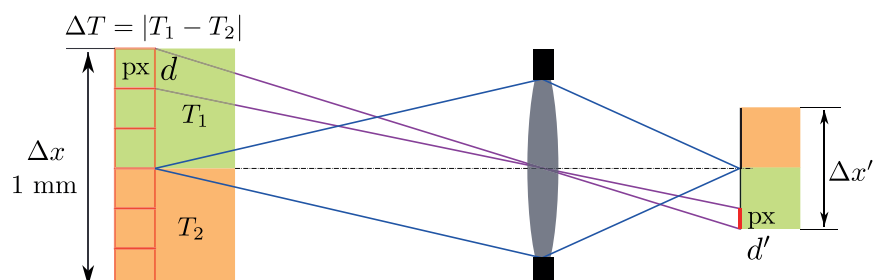


Rys. 2. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia aberracji falowej rozogniskowania

Fig. 2. Schematic for derivation of defocus wave aberration

Rys. 3. Ilustracja powiększenia zdefiniowanego jako liczba pikseli na mm obrazowanego obszaru

Fig. 3. An illustration of lateral magnification defined as a number of pixels over an imaged area



wprowadzono pojęcie „powiększenia detektora”, zdefiniowanego jako liczba pikseli o pewnym wymiarze pokrywających odcinek 1 mm, zgodnie ze wzorem:

$$m_{px} = \frac{m}{d} = mv'_{od} = v'_{od}, \quad (16)$$

Tak zdefiniowana jednostka ma kilka zalet: w przeciwieństwie do częstości przestrzennej jest niezależna od strony układu, która jest rozpatrywana (tzn. jest jednakowa po przedmiotowej i obrazowej stronie układu), uwzględnia zdolność rozdzielczą detektora oraz jest łatwa do interpretacji i wizualizacji.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat pomiaru dwóch obszarów o różnych temperaturach przy pomocy układu realizującego powiększenie 6 px/mm  $MRTD$  w takiej sytuacji pomiarowej jest funkcją wymiaru  $\Delta x$ .

Na rysunku 4 przedstawiono symulację przebiegów funkcji  $MRTD$  dla dwóch wartości aberracji rozogniskowania oraz dla trzech wartości powiększenia w funkcji wielkości obszaru  $\Delta x$  takiego, że:

$$\Delta x = dm_{px} = \frac{1}{v_{xm}} = \frac{1}{mv'_{xm}}, \quad (17)$$

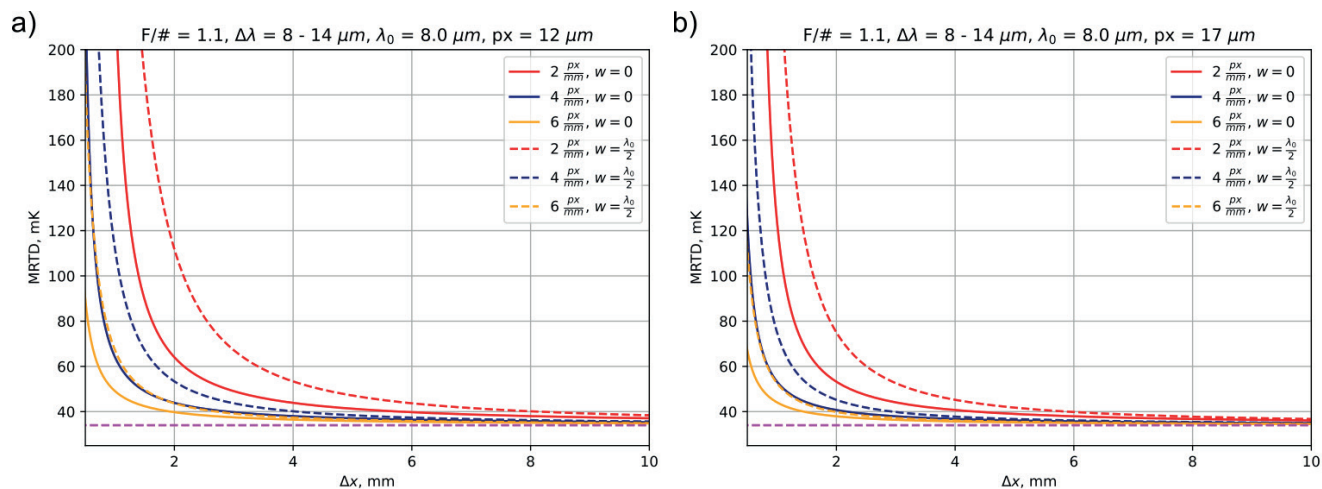
$v_{xm}$  jest częstością przestrzenną, która odpowiada obiektowi o wymiarze  $\Delta x$ . Wielkość  $w$  na rys. 4 oraz 6 należy rozumieć jako  $\max(OPD(u, v))$ .

Wyrażenie (17) opisuje zamianę częstości przestrzennej na powiększenie detektora. W symulacji oszacowano wagi  $c_i$  jako iloczyn funkcji Plancka dla temperatury  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  i pewnej modelowej względnej transmisji widmowej urządzenia (widma transmisji germanu oraz selenku cynku). Przykładowy przebieg takiej charakterystyki przedstawiono na rys. 5.

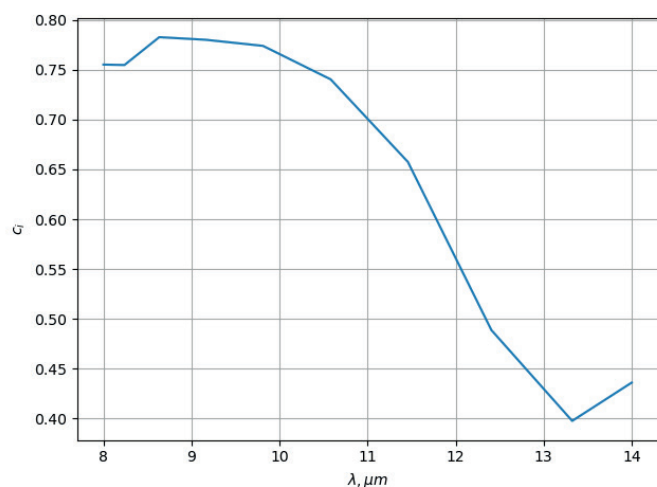
Z wykresu przedstawionego na rys. 4 wynika, że temperaturowa przestrzenna zdolność rozdzielcza asymptotycznie dąży do  $NETD$  (zgodnie z definicją  $MRTD$ ), gdy  $\Delta x \rightarrow \infty$  oraz asymptotycznie dąży do nieskończoności, gdy  $\Delta x \rightarrow 1/m_{px}$ . Zapewnienie określonej temperaturowej zdolności rozdzielczej wymaga zastosowania układu, który zapewni odpowiednie próbkowanie przestrzeni przedmiotowej. Temperaturowa zdolność rozdzielcza jest jednak szybko tracona na skutek aberracji układu optycznego.

Na rys. 6. przedstawiono tę samą funkcję  $MRTD$ , jednak w funkcji powiększenia  $m_{px}$ , gdzie parametrami są wymiary piksela  $d$  oraz wielkość aberracji falowej rozogniskowania  $w$ . Zgodnie ze wzorem (16) asymptotą pionową dla układu bezaberracyjnego zawsze jest  $m_{px} = 1$  (częstość przestrzenna odcięcia detektora w przestrzeni przedmiotowej), niezależnie od wielkości detektora.

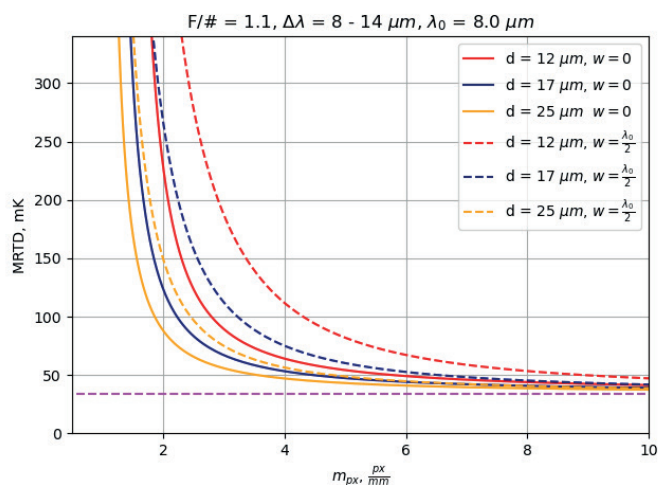
W przypadku szacowania głębi ostrości układu optycznego często stosowane jest kryterium Rayleigha, według którego aberracja o wartości  $\lambda/4$  nie powoduje istotnej utraty zdolności rozdzielczej. Na tej podstawie wyznacza się głębię ostrości układu, czyli akceptowalne odstępstwo położenia detektora od położenia ostrego obrazu (obrazu gaussowskiego). Stosując



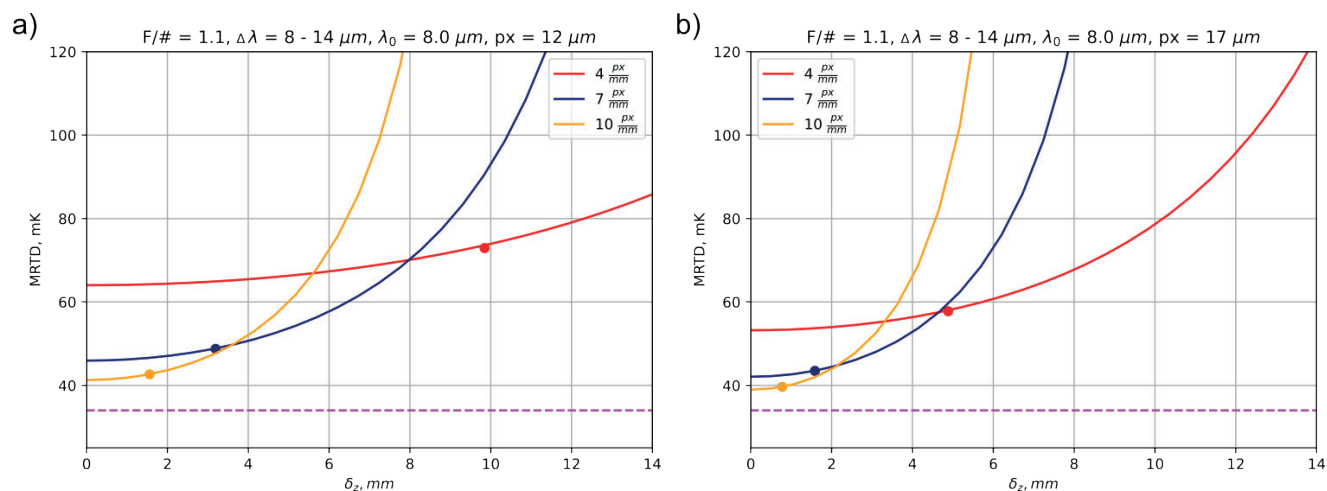
Rys. 4. Wykres funkcji MRTD w funkcji wielkości mierzonego obszaru dla różnych wartości powiększenia oraz wartości rozogniskowania równego 0 oraz  $\lambda_0/2$ : a) dla wymiaru detektora  $12 \mu\text{m}$ , b) dla wymiaru detektora  $17 \mu\text{m}$ . Poziomą przerywaną linią oznaczono wartość NETD  
Fig. 4. MRTD as a function of object size for several magnification values and for defocus values equal to 0 and  $\lambda_0/2$ : a) for  $12 \mu\text{m}$  detector size, b) for  $17 \mu\text{m}$  detector size. The horizontal line marks NETD value



Rys. 5. Wagi długości fali promieniowania przyjęte do obliczeń polichromatycznej PSF  
Fig. 5. Weights of wavelengths for polychromatic PSF calculation



Rys. 6. Wykres funkcji MRTD w funkcji powiększenia układu dla różnych wielkości pikseli oraz wartości rozogniskowania równego 0 oraz  $\lambda_0/2$ . Poziomą przerywaną linią oznaczono wartość NETD  
Fig. 6. MRTD as a function of pixel magnification for different pixel sizes and defocus value equal to 0 and  $\lambda_0/2$ . The horizontal line marks NETD value



Rys. 7. Wykres MRTD w funkcji rozogniskowania obiektywu dla kilku wartości powiększenia układu: a) dla wymiaru detektora  $12 \mu\text{m}$ , b) dla wymiaru detektora  $17 \mu\text{m}$ . Kropkami zaznaczono wartość rozogniskowania powodującą  $OPD = \lambda_0/4$ , poziomą przerywaną linią oznaczono wartość NETD  
Fig. 7. MRTD as a function of defocus for several values of pixel magnification: a) for  $12 \mu\text{m}$  detector size, b) for  $17 \mu\text{m}$  detector size. The dots mark defocus values that result in  $OPD = \lambda_0/4$ , the horizontal line marks NETD

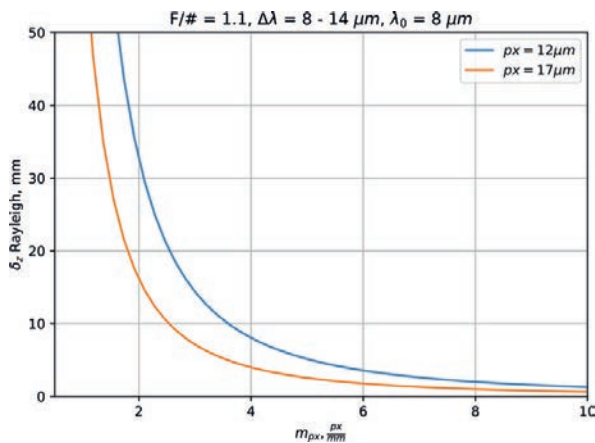
równanie (13), można pokazać, że głębia ostrości po stronie obrazowej układu wynosi [8]:

$$\delta_{z', \text{Rayleigh}} = \pm 2\lambda F_{\#}^2. \quad (18)$$

Za pomocą przedstawionego modelu oceniono wartości *MRTD* na krańcu głębi ostrości danej kryterium Rayleigha. Przyjęto  $\lambda = 8 \mu\text{m}$ .

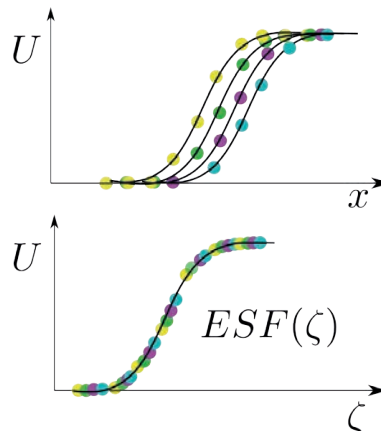
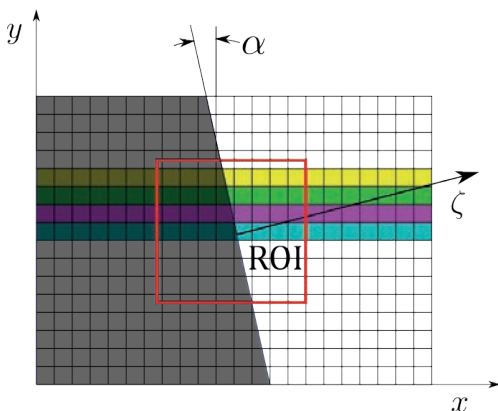
Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi *MRTD* w funkcji rozogniskowania układu (po stronie przedmiotowej), kropkami zaznaczono wartości rozogniskowania wynikające z kryterium Rayleigha. Kropki nie pokrywają się dokładnie z liniami, ponieważ linie zostały wyznaczone dla promieniowania polichromatycznego, wartości dla kryterium Rayleigha muszą zostać obliczone dla konkretnej długości fali. Na rysunku 8 przedstawiono wartość głębi ostrości układu (w przestrzeni przedmiotowej) w funkcji powiększenia detektora, dla dwóch wymiarów detektora. Głębina ostrości jest większa dla mniejszego detektora, ponieważ powiększenie poprzeczne, dla którego wyznaczana jest głębina ostrości jest proporcjonalne do wielkości detektora, głębina ostrości zaś jest odwrotnie proporcjonalna do powiększenia poprzecznego układu.

Pomiar *MTF* z zastosowaniem definicji (3) jest niepraktyczny, ze względu na niedostateczne próbkowanie obrazu punktowego przez detektory matrycowe. Aby ominąć to ograniczenie, powszechnie stosuje się metodę pochylonej krawędzi [9–11]. W metodzie tej uzyskuje się syntetyczną krawędź z subpikselową dokładnością przez zrzutowanie kilku krawędzi (o słabym próbkowaniu) na wspólną oś, następnie obliczana jest jednowymiarowa *OTF* według zależności [4]:



Rys. 8. Wykres głębi ostrości po stronie przedmiotowej układu zgodnie z kryterium Rayleigha w funkcji powiększenia detektora dla dwóch wielkości detektora

Rys. 8. Depth of field according to Rayleigh criterion as a function of pixel magnification for two different pixel sizes



Rys. 9. Schemat ideowy wyznaczenia obrazu krawędzi z subpikselową dokładnością

Fig. 9. Construction of an edge-spread function with sub-pixel accuracy

$$OTF(v_{\zeta}) = \mathcal{F}[LSF(\zeta)], \quad (19)$$

gdzie *LSF* oznacza funkcję rozmycia linii (ang. *Line Spread Function*),  $\zeta$  jest osią prostopadłą do krawędzi. *LSF* obliczana jest na podstawie obrazu krawędzi zgodnie z zależnością:

$$LSF(\zeta) = \frac{d}{d\zeta}[ESF(\zeta)], \quad (20)$$

gdzie *ESF* jest funkcją rozmycia krawędzi (ang. *Edge Spread Function*).

Istotę metody uzyskiwania obrazu krawędzi z subpikselową dokładnością przedstawiono na rys. 9,  $U$  jest wartością sygnału z matrycy detektorów.

Algorytm obliczenia *MTF* metodą pochylonej krawędzi składa się, w jednej z kilku implementacji tego algorytmu, z następujących kroków:

- zarejestrowanie obrazu krawędzi oraz odczyt sygnału z matrycy w funkcji współrzędnej  $x$  matrycy dla  $n_y$  wierszy, tzn.  $U(x, y)$
- aproksymacja każdej krawędzi wybraną parametryczną funkcją sigmoidalną, gdzie punkt przegięcia  $x_0$  jest jednym z parametrów,
- obliczenie kąta pochylenia krawędzi z aproksymacji liniowej:  $x_0 = \text{tg}(\alpha) \cdot y + b$ ,
- zrzutowanie wszystkich punktów  $U(x, y)$  na oś  $\zeta$  i uzyskanie funkcji  $U(\zeta)$ :

$$\zeta(x, y) = [x - x_0(y)] \cos(\alpha)$$

- ponowne próbkowanie  $U(\zeta)$  z równomiernym krokiem,
- filtracja krawędzi  $U(\zeta)$ ,
- różniczkowanie  $U(\zeta)$ ,
- transformacja Fouriera zróżniczkowanej krawędzi.

### 3. Pomiar MRTD w funkcji rozogniskowania układu

W celu weryfikacji modelu wykonano pomiary *MRTD* w funkcji rozogniskowania układu dla kilku wartości powiększenia  $m_{px}$ . Pomiary wykonano dla prototypowego obiektywu zaprojektowanego na potrzeby projektu „Fotonica”. Zdjęcie stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 10. W kamerze zastosowano detektor bolometryczny Pico 640 firmy Lynred o wielkości piksela  $17 \mu\text{m}$ . *MTF* została wyznaczona dobrze opisaną metodą pochylonej krawędzi, której szczegóły implementacji można znaleźć m.in. w opracowaniu [9].

Zrzutowaną krawędź interpolowano z krokiem  $1/16 \text{ px}$ , następnie poddano filtracji filtrem Savitzkiego-Golaya. Przed

wykonaniem pomiarów *MRTD* wyznaczono wartość *NETD* dla badanej kamery, która dla ciała o temperaturze 25 °C wynosi 34 mK. Ponieważ parametr *NETD* jest niezależny od pomiaru *MRTD*, można przyjąć dowolną jego wartość. Pomiar *MRTD* wykonano dla krawędzi pionowej i poziomej przy pomocy odpowiedniego testu o wysokiej emisyjności.

Na rys 11. przedstawiono obszary analizy krawędzi pionowej i poziomej dla jednego z testów.

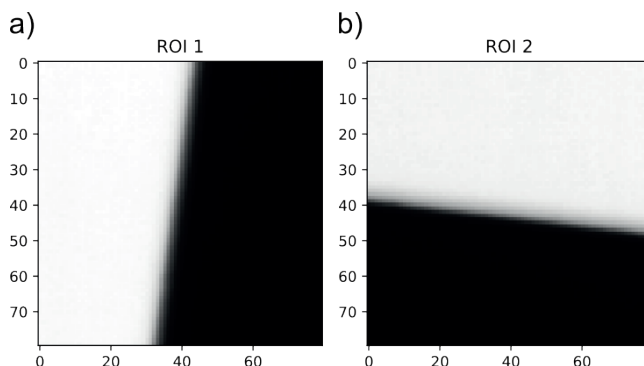
Pomiary wykonano na zautomatyzowanym stanowisku. Ciało czarne wraz z testem ustawiono na stoliku przesuwającym napędzanym silnikiem krokowym. W połowie zakresu ruchu stolika ustawiono ciało wraz z testem i w takim położeniu ostro odwzorowano test na matrycy oraz wykonano pomiar powiększenia  $m_{px}$ . Pomiary wykonano dla czterech

wartości  $m_{px}$ . Dla każdego powiększenia zarejestrowano 61 pomiarów co 0,5 mm, dzięki czemu uzyskano wartości rozogniskowania w przedziale ±15 mm. Dla każdego położenia testu wyznaczono przebiegi *MTF* w płaszczyźnie pionowej i poziomej, następnie wyznaczono przebiegi *MRTD* zgodnie z zależnością:

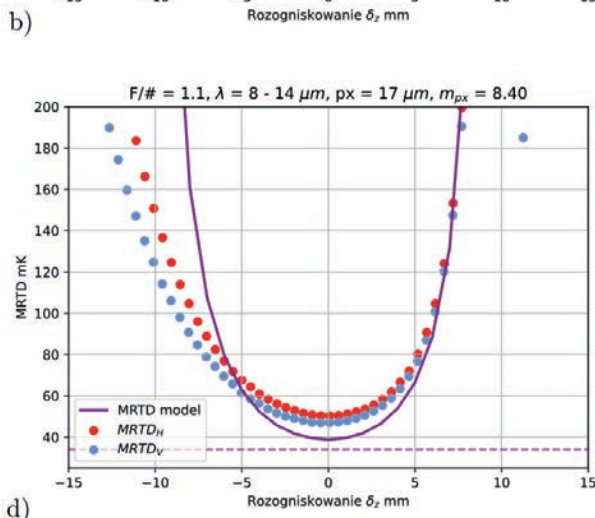
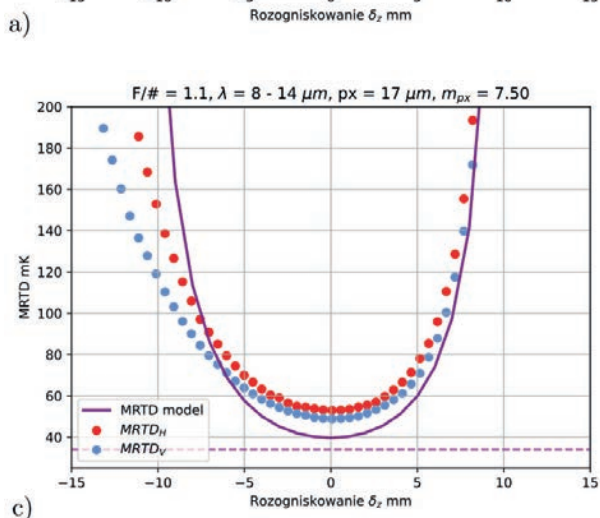
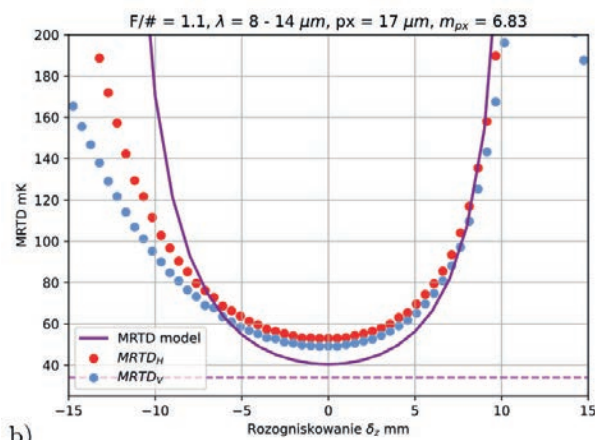
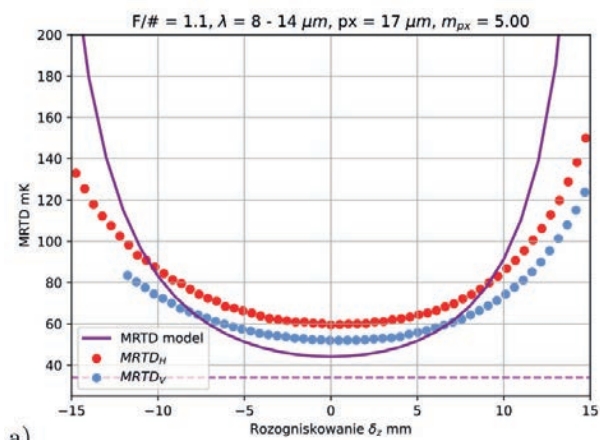
$$MRTD_{H,V}(m_{px}, \delta_z) = \frac{NETD(T_0)}{MTF_{H,V}\left(v_{x,y} = \frac{1}{dm_{px}}, OPD(\delta_z)\right)} \quad (21)$$



Rys. 10. Badana kamera termowizyjna na stanowisku pomiarowym  
Fig. 10. Tested infrared camera on a measurement stand



Rys. 11. Obszary analizy krawędzi a) pionowej i b) poziomej zastosowane do wyznaczenia *MTF*  
Fig. 11. Regions of interest containing a) vertical and b) horizontal edges for *MTF* evaluation



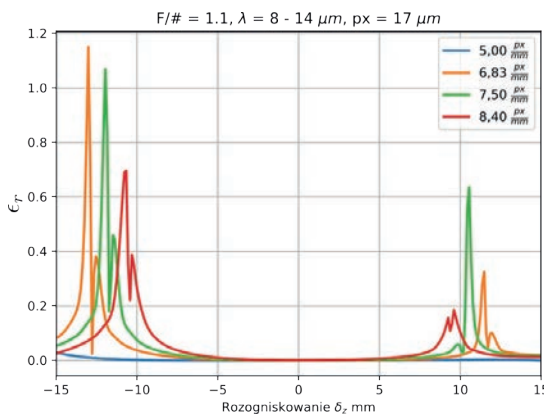
Rys. 12. Przebiegi zmierzonych funkcji *MRTD* wraz z funkcjami modelowymi dla powiększenia  $m_{px}$  układu: a) 5,00 px/mm, b) 6,83 px/mm, c) 7,50 px/mm, d) 8,40 px/mm

Fig. 12. Measured *MRTD* values and model *MRTD* function for system pixel magnification values: a) 5.00 px/mm, b) 6.83 px/mm, c) 7.50 px/mm, d) 8.40 px/mm

Na rysunku 12 przedstawiono wyniki pomiaru funkcji  $MRTD$  wraz z przebiegiem modelowym dla bezaberracyjnego układu i zmierzonymi wartościami  $m_{pz}$ .

Uzyskane krzywe sprowadzono do teoretycznego środka. Konieczność ta wynika z braku ruchów justerskich umożliwiających zapewnienie prostopadłości osi optycznej obiektywu do detektora, co skutkowało przesunięciem krzywych. Należy zaznaczyć, że modelowe krzywe zostały wyznaczone dla idealnej cieniowej soczewki. W rzeczywistości obiektyw zawsze ma pewne nieskorygowane aberracje już na etapie projektu układu. Błędy montażu oraz niedoskonałość wykonania elementów optycznych dodatkowo wpływają na pogorszenie przebiegu  $MTF$ . Badany obiektyw miał charakter prototypowy, a jego tubus został wykonany w technologii druku 3D, co skutkowało ograniczoną dokładnością montażu elementów optycznych. Co więcej, układ idealny tworzy idealny obraz bez względu na powiększenie. W rzeczywistości jakość odwzorowania może ulegać znacznemu pogorszeniu w szczególności dla większych wartości powiększenia. Pomiar  $MRTD$  wykonano możliwie blisko środka pola widzenia, jednak test krawędziowy zawsze obejmuje pozaosiową część pola, gdzie  $MTF$  zwykle odbiega od idealnego przebiegu. Z wymienionych wyżej powodów liczbowe porównanie wyniku modelowego z pomiarem teoretycznym jest bezcelowe, tzn. nie umożliwia oceny poprawności modelu. Poprawność obliczeń zweryfikowano, porównując je z danymi otrzymanymi w wyniku analizy „Through Focus MTF” przeprowadzonej w programie Zemax [12]. Modelowy układ symulowany był jako soczewka przyosiowa („Paraxial lens”). Błąd modelu w odniesieniu do danych referencyjnych został obliczony jako:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_i [MRTD_{model}(\delta_{z,i}) - MRTD_{Zemax}(\delta_{z,i})]^2}{N_i}} \quad (22)$$



Rys. 13. Względny błąd modelu w odniesieniu do obliczeń w programie Zemax

Fig. 13. Relative model error referenced to calculations in Zemax

Tab. 1. Błąd modelu w odniesieniu do danych programu Zemax

Tab. 1. Model error with respect to Zemax data

$m_{pz} \left[ \frac{\text{px}}{\text{mm}} \right]$		5,00	6,83	7,50	8,40
$\delta_z = \pm 5 \text{ mm}$	$\varepsilon \text{ [mK]}$	0,01	0,07	0,1	0,2
$\delta_z = \pm 10 \text{ mm}$		0,08	1,4	6,1	100,2

Na rys. 13. przedstawiono względny błąd modelu obliczony jako:

$$\varepsilon_r = \frac{|MRTD_{model} - MRTD_{Zemax}|}{MRTD_{Zemax}} \quad (23)$$

Wyniki zaimplementowanego modelu są zgodne z analizą uzyskaną w programie Zemax w przedziale rozogniskowania  $\pm 10 \text{ mm}$  dla analizowanych wartości powiększeń, poza powiększeniem  $8,4 \text{ px/mm}$ . Dla tego powiększenia  $MRTD$  ma asymptotę pionową w tym przedziale. Jedynie dla powiększenia  $5 \text{ px/mm}$   $MRTD$  nie ma asymptoty pionowej w całym analizowanym zakresie i dla tej wartości powiększenia błędy są ograniczone. Różnice między uzyskanymi wynikami mogą być skutkiem m.in. różnic w implementacji algorytmu obliczającego polichromatyczną  $PSF$ , gdzie wymagana jest interpolacja poszczególnych  $PSF$ . Nawet niewielkie różnice w otrzymanych przebiegach  $MTF$  będą skutkowały dużymi błędami w wyznaczeniu  $MRTD$  w pobliżu wartości, gdzie jedna z  $MTF$  osiąga wartość bliską 0.

## 4. Wnioski

Stosowana zwykle miara rozdzielczości temperaturowej  $NETD$ , nie stanowi dobrej miary przestrzennej temperaturowej zdolności rozdzielczej w przypadku obrazowania obszarów o niewielkich wymiarach. W pracy zaprezentowano model umożliwiający wyznaczenie teoretycznej przestrzennej rozdzielczości temperaturowej kamery termowizyjnej w funkcji jej powiększenia oraz rozogniskowania. Model został w całości zaimplementowany w języku Python i w dużej mierze jest zgodny z wynikami otrzymanymi z komercyjnego oprogramowania przeznaczonego do projektowania układów optycznych. Jego główną zaletą jest możliwość określenia wymaganych parametrów kamery, które pozwolą na uzyskanie wymaganej rozdzielczości temperaturowej, w zależności od wielkości obrazowanego obiektu.

Stosowane zwykle do określenia głębi ostrości układu kryterium Rayleigha uwzględnia tylko optyczną składową zdolności rozdzielczej. Z przedstawionej analizy wynika, że pominięcie charakterystyki  $MTF$  detektora skutkuje znacznymi różnicami w przestrzennej temperaturowej zdolności rozdzielczej kamery wewnątrz zakresu głębi ostrości.

## Podziękowania

Badania współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Ścieżka dla Mazowsza w projekcie „FOTONICA (Fully-automated Optoelectronic System for Noninvasive Imaging in Clinical Applications) – Sztuczna Inteligencja wspomagająca zaawansowane rozwiązania fotoniczne w automatycznych diagnostycznych systemach medycznych”, umowa nr MAZOWSZE/0167/19-00. Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 724/2022.

## Bibliografia

1. Tissot J.L., *Uncooled infrared detectors: state of the art*. VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni TTP 2006, Ustroń-Jaszowiec, 16–18 listopada, 2006, 9–23.
2. Military Agency for Standardization, *Standardization agreement, Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems*, 1995.
3. Born M., Wolf E., *Principles of Optics*, Londyn, Nowy Jork, Paryż, Los Angeles: Pergamon Press, 1959.
4. Singer W., Totzek M., Gross H., *Handbook of Optical Systems: Vol. 2: Physical Image Formation*, H. Gross, Red., Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
5. Fischer R.E., Tadic-Galeb B., Yoder P.R., *Optical Systems Design*, 2<sup>nd</sup> edition red., McGraw Hill, 2008.
6. Holst G.C., *Electro-Optical Imaging System Performance*, 5<sup>th</sup> ed. red., Winter Park, FL: JCD Publishing, 2008.
7. Mack C.A., *Field Guide to Optical Lithography*, Bellingham, WA: SPIE Press, 2006.
8. Wyant J.C., Creath K., *Applied optics and optical engineering*, tom XI, Tuscon: Academic Press, 1992.
9. Viallefont-Robinet F., Helder D., Fraisse R., Newbury A., van den Bergh F., Lee D., Saunier S., *Comparison of MTF measurements using edge method: towards reference data set*, "Optics Express", Vol. 26, No. 26, 2018 33625–33648, DOI: 10.1364/OE.26.033625.
10. Hwang H., Choi Y.-W., Kwak S., Kim M., Park W., *MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method*, Proceedings of SPIE 7109, Image and Signal Processing for Remote Sensing XIV, 2008, DOI: 10.1117/12.800055.
11. Crespi M., Vendictis L.D., *A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment*, "Sensors", Vol. 9, No. 5, 2009, 3289–3313, DOI: 1424-8220/9/5/3289.
12. Zemax LLC, *Zemax 13 Release 2 SP2*, 2014.

# A Method of Measurement of Minimum Resolvable Temperature Difference as a Function of Magnification and Defocusing of a Thermal Camera

**Abstract:** Temperature measurement of allergic skin reactions requires meeting certain criteria regarding temperature resolution between small areas. The usual criterion of temperature resolution is NETD. However, this metric does not take into account the limitations of the spatial resolution of the optical system or the detector. In this paper, a model is presented that allows for selection of camera parameters based on the required spatial thermal resolution and size of the object being imaged. The method has been implemented and compared to results obtained in commercial software and has been applied to evaluate spatial thermal resolution of a prototype objective designed for the LWIR band.

**Keywords:** NETD, MRTD, depth of field, depth of focus, spatial resolution, thermal resolution, medical imaging, allergic reaction thermal imaging

## dr inż. Sławomir Gogler

slawomir.gogler@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-3002-6362

Ukończył Politechnikę Warszawską w 2011 r. na Wydziale Mechatroniki. W 2020 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w Wojskowej Akademii Technicznej. Zajmuje się zagadnieniami konstrukcji układów optycznych oraz modelowaniem matematyczno-fizycznym.



## dr inż. Krzysztof Sawicki

krzysztof.sawicki@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-1368-3854

Ukończył Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2009 r.; rozprawa doktorska z tematyki steganografii w sieciach bezprzewodowych obroniona w WAT w 2019 r.; jego zainteresowania skupiają się na sieciach bezprzewodowych, bezpieczeństwie teleinformatycznym, steganografii i systemach wbudowanych.



## mgr inż. Andrzej Ligienza

andrzej.ligienza@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-5789-8531

Tytuł inżyniera otrzymał w 2014 r. po ukończeniu kierunku mechatronika ze specjalizacją inżynierii systemów mechatronicznych. Tytuł magistra otrzymał w 2016 r. po ukończeniu kierunku optoelektronika ze specjalizacją inżynierii systemów optoelektronicznych. W 2018 r. objął stanowisko starszego inżyniera w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT.



## Mariusz Mścichowski

mariusz.mscichowski@student.wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-0079-1960

Student Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jego zawodowe zainteresowania skupiają się na cyfrowych pomiarowych układach elektronicznych oraz szybkim prototypowaniu FDM.

