

Radiacyjny model obudowy chłodzonego matrycowego detektora podczerwieni

Tomasz Sosnowski, Grzegorz Bieszczad, Sławomir Gogler, Henryk Madura
Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Mariusz Felczak, Robert Strąkowski

Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Elektroniki, ul. Wólczarńska 211/215, 90-924 Łódź

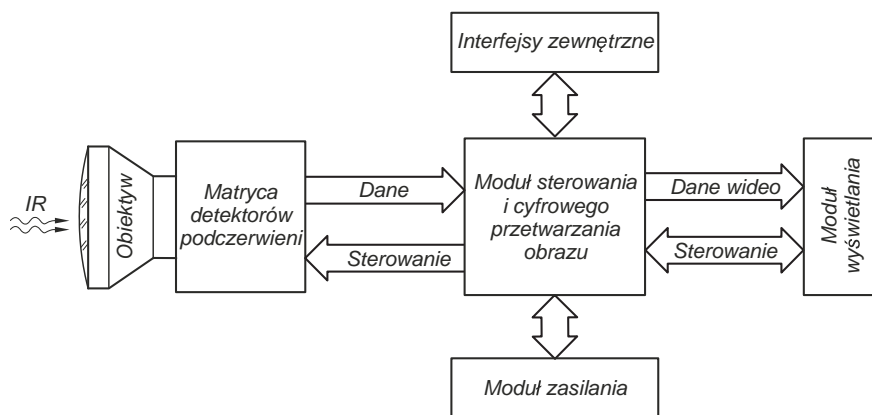
Streszczenie: Kamera termowizyjna rejestruje promieniowanie podczerwone pochodzące od obserwowanych obiektów. Jej głównym elementem jest matryca detektorów podczerwieni, która przetwarza odbierane promieniowanie na sygnał elektryczny. Źródła promieniowania rejestrowane przez detektor można podzielić jako użyteczne odbierane z obserwowanej sceny oraz nieużyteczne odbierane od takich obiektów jak obudowa detektora, elementy obiektywu. Te nieużyteczne źródła promieniowania mają istotny wpływ na konstrukcję samego detektora. W artykule przedstawiono model obudowy detektora oraz ilościową analizę wpływu różnych źródeł promieniowania na możliwość skutecznej detekcji promieniowania z obserwowanej scenie.

Słowa kluczowe: promieniowanie radiacyjne, termowizja

1. Wprowadzenie

Kamera termowizyjna rejestruje promieniowanie podczerwone pochodzące od obserwowanych obiektów i jest zbudowana z takich podstawowych elementów jak [1, 8, 9]: matryca detektorów podczerwieni, obiektyw dla danego zakresu podczerwieni, układy elektroniczne zapewniające odczyt sygnału z detektora oraz rejestrację i analizę sygnału, a także moduł wyświetlania. Zależnie od spektralnego zakresu pracy, kamery termowizyjne dzieli się najczęściej na średniofalowe MWIR (zakres pracy 3–5 μm) i długofalowe LWIR (8–14 μm). Ogólny schemat kamery termowizyjnej został przedstawiony na rysunku 1.

Najważniejszym i najbardziej technologicznie zaawansowanym elementem kamery termowizyjnej jest moduł matrycy detektorów podczerwieni. Do budowy nowoczesnych obserwacyjnych kamer termowizyjnych używa się głównie matrycowych detektorów chłodzonych wykonanych z InSb, HgCdTe lub detektorów QWIP. Wymiary matrycy detektorów podczerwieni są dosto-



Rys. 1. Ogólny schemat kamery termowizyjnej z podziałem na podstawowe moduły funkcjonalne

Fig. 1. Overview diagram of the thermal imaging camera divided into basic functional modules

rowane do standardów wyświetlania obrazów i najczęściej są to matryce o wymiarach: 320 × 240, 384 × 288, 640 × 480, 640 × 512, 1280 × 1024 detektorów. Minimalna wielkość pojedynczego detektora (piksela) dla matryc zakresu MWIR wynosi obecnie 10 μm , a dla zakresu LWIR 12 μm . Rozdzielczości termiczne detektorów chłodzonych są rzędu 10–20 mK. Widok matrycowych detektorów podczerwieni z układami chłodzenia i elektronicznymi zespołami odczytu danych przedstawiono na rys. 2.

W matrycowych detektorach chłodzonych kriogenicznie do temperatury 77–90 K, w szczególności dla zakresu MWIR (3–5 μm), stosowane są rozwiązania konstrukcyjne z tzw. zimną przesłoną. W projektowanych i opracowywanych obecnie chłodzonych detektorach matrycowych podwyższa się temperaturę ich pracy. Jest to związane z tym, że wyższa temperatura pracy znacząco zwiększa czas bezawaryjnej pracy, w szczególności

Autor korespondujący:

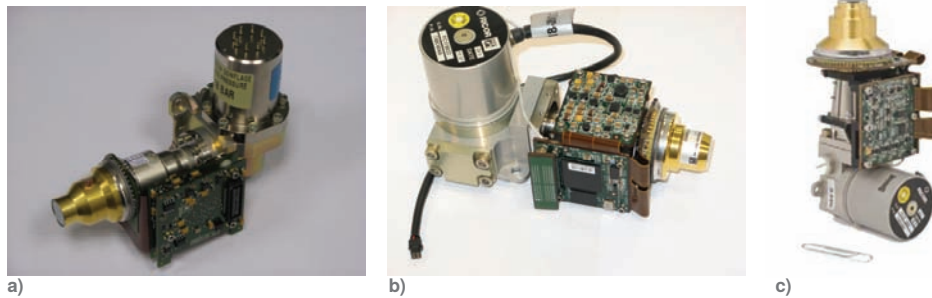
Tomasz Sosnowski, tsosnowski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 16.06.2021 r., przyjęty do druku 20.09.2021 r.



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



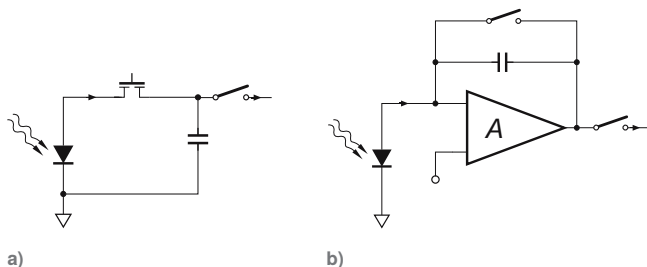
Rys. 2. Widok matrycowych detektorów podczerwieni z układami chłodzenia i elektronicznymi zespołami układów odczytu danych: detektor LEO 640 × 512 firmy SOFRADIR (a), detektor PELICAN 640 × 512 firmy SCD (b) oraz detektor HERCULES 1280 × 1024 firmy SCD (c)
Fig. 2. View of infrared detectors arrays with cooling systems and electronic data readout circuit: detector LEO 640 × 512 from SOFRADIR (a), the detector PELICAN 640 × 512 from SCD (b) and detector HERCULES 1280 × 1024 from SCD (c)

wydłużając czas pracy chłodziarek mechanicznych. Po przekroczeniu temperatury około 190–210 K możliwe jest zastosowanie ogniw Peltiera, co eliminuje konieczność stosowania mechanicznych układów chłodzących. W związku z tym wymagane jest określenie optymalnego rozwiązania konstrukcji optyczno-mechanicznej oraz poziomu chłodzenia umożliwiającego zastosowanie odpowiednio dobranego układu odczytu detektorów.

Podstawowymi właściwościami detektora mającymi bezpośredni wpływ na efektywne reagowanie na zmianę promieniowania jest czułość detektora matrycy oraz konstrukcja i sposób działania układu odczytu ROIC (ang. *readout integrated circuit*). Większość matrycowych detektorów podczerwieni jest konstruowana pod kątem maksymalizacji czułości detektora, ponieważ duża czułość detekcji pozwala najczęściej osiągać znacznie lepszy stosunek sygnału do szumu. Wartość czułości oraz stosunku sygnału do szumu ma duży wpływ na jakość zobrazowania obserwowanej sceny przez urządzenia stosujące te detektory. W układach matryc detektorów podczerwieni IRFPA (ang. *infrared focal plane arrays*) można wydzielić dwie główne części: matrycę detektorów podczerwieni oraz scalony układ odczytu (ROIC). Podstawową funkcją tych elementów jest zapewnienie konwersji i wzmocnienia sygnału detektorów podczerwieni.

Opracowano wiele rodzajów układów odczytu ROIC, jednak w praktyce najczęściej stosuje się dwa: układy z wstrzykiwaniem ładunku DI (ang. *direct injection circuits*) oraz układy z pojemnościowym wzmacniaczem transimpedancyjnym (wzmacniacz transimpedancyjny z kondensatorem w gałęzi sprzężenia zwrotnego) CTIA (ang. *capacitor feedback transimpedance amplifier*). Układy DI (rys. 3a) charakteryzują się niewielkim poborem energii oraz wysoką wydajnością dla dużych wartości prądu ciemnego. Układy CTIA (rys. 3b) mają wyższe zapotrzebowanie na energię oraz wyższą wydajność przy niskiej wartości prądu ciemnego.

Ze względu na niższe zapotrzebowanie na energię w konstrukcji układu matrycy detektorów podczerwieni częściej sto-



Rys. 3. Układ z wstrzykiwaniem ładunku DI (a) [7] oraz wzmacniacz transimpedancyjny z pojemnością w pętli sprzężenia zwrotnego CTIA (b) [7]
Fig. 3. Direct injection circuit DI (a) [7] and Capacitor feedback transimpedance amplifier (CTIA) (b) [7]

sowany układ odczytu ROIC z wstrzykiwaniem ładunku DI (ang. *direct injection circuits*). W układzie odczytu z wstrzykiwaniem ładunku (rys. 3a) obwód całkowania sygnału z detektora podczerwieni zamyka się przez kanał aktywnego tranzystora. Fotoprąd detektora w układzie ROIC jest wstrzykiwany przez źródło tranzystora do pojemności całkowującej (zerowanej na początku ramki). Fotoprąd wytworzony w detektorze powoduje ładowanie kondensatora w ciągu całego cyklu pomiarowego

(procesu całkowania). Czas trwania cyklu pomiarowego (całkowania) jest nazywany czasem całkowania (ang. *integration time*). Po zakończeniu procesu całkowania, napięcie z kondensatora jest odczytywane przez multiplexer. Z przedstawionego powyżej sposobu działania układu ROIC wynika, że napięcie kondensatora jest proporcjonalne do zgromadzonego w nim ładunku, który jest proporcjonalny do całkowitej mocy padającego na detektor promieniowania. Detektor matrycy odbiera promieniowanie pochodzące od wszystkich „widzianych” przez niego elementów. „Widziane” przez detektor elementy to nie tylko obiekty obserwowanej sceny (przedmioty, ludzie), ale także obudowa detektora, obudowa obiektywu, soczewki itp. Wynika z tego, że efektywność działania detektora podczerwieni zależy od zdolności do reagowania na zmianę mocy promieniowania użytecznego (padającego na detektor i pochodzącego z obserwowanej sceny) przy uwzględnieniu mocy promieniowania nieużytecznego (padającego na detektor i pochodzącego z obudowy kamery, obudowy detektora, soczewek układu optycznego). Biorąc pod uwagę, że pojemność kondensatora całkowującego w układzie ROIC ma skończoną, ściśle określoną wielkość to należy przeanalizować ilościowy udział promieniowania użytecznego (ze sceny) oraz promieniowania nieużytecznego – zakłócającego pomiar.

2. Model radiacyjny detektora matrycowego

Głównym celem analizy jest określenie teoretycznej, ilościowej wielkości ładunku gromadzonego w kondensatorze układu całkowującego w zależności od źródła promieniowania odbieranego przez detektor. W tym celu zostały opracowane uproszczone modele kamery termowizyjnej, dla których wyznaczono numerycznie moc promieniowania odbieranego od elementów otaczających detektor. Opracowane modele, symulacja i związane z nią obliczenia opierają się na następujących założeniach:

- W modelu brane jest pod uwagę tylko promieniowanie (emisja) cieplne obiektu/sceny i promieniowanie wewnętrzne (w modelu nie uwzględnia się odbitego światła słonecznego oraz emitowanego przez inne obiekty niewidoczne bezpośrednio przez kamerę).
- Zakłada się, że wszystkie elementy obserwowane przez kamerę, w szczególności „zimna” przesłona detektora, są powierzchniami doskonale lambertowskimi z emisyjnością równą jedności.
- Nie uwzględniono wpływu zewnętrznego światła rozproszonego poza pole widzenia czujnika.

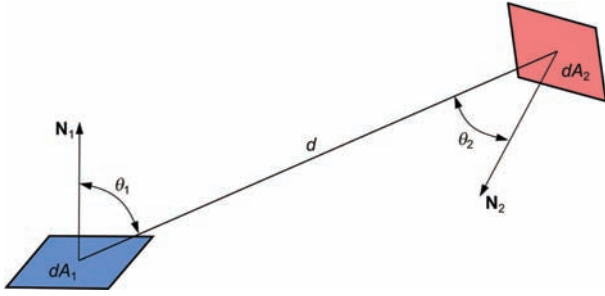
Prawa dotyczące propagacji (przenoszenia) promieniowania między powierzchniami są jednymi z podstawowych stosowanych w radiometrii [3, 12, 13]. W sytuacji przedstawionej na rysunku 4 dwa obszary elementarne dA_1 i dA_2 są poło-

żone względem siebie w odległości d , przy czym kąty między wektorem normalnym każdej powierzchni a prostą łączącą te powierzchnie wynoszą θ_1 i θ_2 . Przez obie powierzchnie przepływa ten sam strumień i zgodnie z definicją luminancji [10–13]:

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\cos \theta \partial A \partial \Omega'} \quad (1)$$

przy założeniu, że strumień promieniowania jest propagowany przez bezstratny ośrodek optyczny, można napisać wzór stanowiący podstawowe prawo radiometrii (ang. *fundamental law of radiometry*) [5, 10–13]:

$$d^2 \Phi = \frac{L_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{d^2} dA_1 dA_2. \quad (2)$$



Rys. 4. Zależności geometryczne dla przenoszenia (transferu) promieniowania między dwiema powierzchniami dA_1 i dA_2

Fig. 4. Geometric relationships for radiation transfer between two surfaces dA_1 and dA_2

Moc promieniowania emitowana przez powierzchnię dA_1 i odbierana przez powierzchnię dA_2 zależy od odległości i względnej orientacji dwóch obszarów względem linii łączącej. W tym opracowaniu „mały obszar” (pochodna) jest używana dla strumienia, pola i kąta bryłowego, przy założeniu, że ma zastosowanie do małych obszarów źródła elementarnego i odbiornika [3, 12, 13].

W celu wyznaczenia jaka część mocy promieniowania wyemitowana z powierzchni 1 (obiektu emitującego promieniowanie) dociera do powierzchni 2 (obiektu odbierającego promieniowanie) można skorzystać ze wzoru (3) [5]:

$$F_{1-2} = \frac{\Phi_{1-2}^*}{\Phi_1^*}, \quad (3)$$

gdzie: Φ_{1-2}^* – moc promieniowania wypromieniowana z powierzchni 1 i padająca na powierzchnię 2, Φ_1^* – całkowita moc promieniowania emitowana przez powierzchnię 1 w półprzestrzeń.

Uzyskana wartość F_{1-2} jest nazywana współczynnikiem konfiguracji (ang. *view factor, configuration factor*) i określana ogólnie jako część mocy promieniowania opuszczającego powierzchnię, która bezpośrednio dociera do innej powierzchni.

W przypadku, gdy wymiana energii zachodzi między powierzchnią dA_1 o dyskretnych wymiarach i powierzchnią A_2 o skończonych wymiarach, do wyznaczenia współczynnika konfiguracji wzór (3) przyjmuje postać:

$$F_{d1-2} = \frac{\Phi_{d1-2}}{\Phi_{d1}}. \quad (4)$$

W takim przypadku część całkowitej mocy Φ_{d1-2} promieniowania dyskretnego powierzchni dA_1 obiektu emitującego promieniowanie, która pada na skończoną powierzchnię A_2 obiektu odbierającego promieniowanie można określić za pomocą wzoru (2) otrzymując:

$$\Phi_{d1-2} = L_1 dA_1 \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{d^2} dA_2. \quad (5)$$

Całkowita moc promieniowania Φ_{d1} , która jest emitowana przez dyskretną powierzchnię dA_1 w półprzestrzeń jest wyrażona wzorem:

$$\Phi_{d1} = \pi L_1 dA_1. \quad (6)$$

Podstawiając do wzoru (4) zależności (5) i (6) otrzymuje się ogólny wzór dla współczynnika konfiguracji przypadku wymiany energii między powierzchniami 1 i 2:

$$F_{d1-2} = \frac{1}{\pi} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{d^2} dA_2. \quad (7)$$

Relacja wzajemności (ang. *reciprocity relation*) dla przypadku wymiany energii między dyskretną powierzchnią dA_1 i powierzchnią A_2 o skończonych wymiarach może zostać określona wzorem (8) [5]:

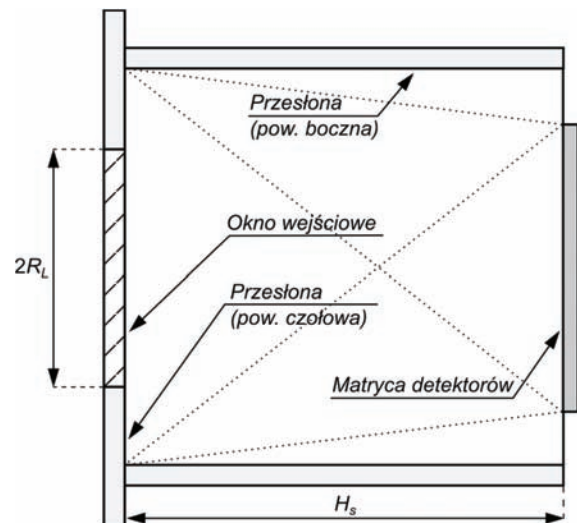
$$dA_1 \cdot F_{d1-2} = A_2 \cdot F_{2-d1}. \quad (8)$$

W opracowanym modelu kamery przyjęto, że zawiera ona okno wejściowe W , powierzchnię boczną S i czołową P przesłony (powierzchnię boczną i czołową obudowy detektora), okno wyjściowe L i matrycę detektorów podczerwieni D . Model pozwala na oszacowanie wielkości mocy promieniowania emitowanego przez ww. powierzchnie i padającego na każdy z detektorów matrycy.

Wyznaczenie mocy promieniowania padającego na detektor jest możliwe przez określenie radiacyjnej wymiany ciepła między powierzchnią detektora a powierzchniami okna wejściowego i przesłony. W przedstawionym modelu przyjęto następujące założenia:

- powierzchnia pojedynczego detektora podczerwieni D jest powierzchnią dyskretną dA_D ,
- powierzchnia okna wejściowego L jest skończoną powierzchnią A_L ,
- powierzchnia przesłony S (obudowy detektora) jest skończoną powierzchnią A_S ,
- powierzchnia czołowa przesłony P jest skończoną powierzchnią A_P .

Na rysunku 5 został przedstawiony schemat modelu kamery z matrycą detektorów zamkniętą w prostopadłościennym obudowie.



Rys. 5. Model zespołu obudowy detektora z przesłoną prostopadłościenną oraz ekwiwalentem obiektywu

Fig. 5. Model of the detector housing assembly with a cuboidal diaphragm and an lens equivalent

Dla powyższych założeń moc padającego na detektor promieniowania emitowanego przez powierzchnie modelu można przedstawić za pomocą wzorów:

$$\Phi_{L-dD} = A_L F_{L-dD} M_L(T_L), \quad (9)$$

$$\Phi_{S-dD} = A_S F_{S-dD} M_S(T_S), \quad (10)$$

$$\Phi_{P-dD} = A_P F_{P-dD} M_P(T_P), \quad (11)$$

$$\Phi_{Tot-dD} = \Phi_{L-dD} + \Phi_{S-dD} + \Phi_{P-dD} \quad (12)$$

gdzie: Φ_{X-dD} – moc promieniowania wypromieniowana z powierzchni X i padająca na dyskretną powierzchnię detektora D , F_{X-dD} – współczynnik konfiguracji określający jaka część mocy promieniowania wyemitowana z powierzchni X dociera do dyskretnej powierzchni detektora D , A_X – pole powierzchni X , M_X – egzytancja energetyczna powierzchni X , T_X – temperatura powierzchni X , X – odpowiednio oznacza powierzchnię L, S, P .

Korzystając z zasady wzajemności (8) wzory (9), (10), (11) przyjmują postać:

$$\Phi_{L-dD} = A_D F_{dD-L} M_L(T_L), \quad (13)$$

$$\Phi_{S-dD} = A_D F_{dD-S} M_S(T_S), \quad (14)$$

$$\Phi_{P-dD} = A_D F_{dD-P} M_P(T_P), \quad (15)$$

gdzie: A_D to pole powierzchni detektora matrycy.

Zgodnie z prawem Plancka rozkład widmowy egzytancji energetycznej (emitancji) ciała czarnego o temperaturze T w funkcji długości fali można przedstawić za pomocą wzoru (16) [10, 11, 13]:

$$M_\lambda(T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)}, \quad (16)$$

gdzie: T – temperatura, λ – długość fali, h – stała Plancka, c – prędkość światła w próżni, k – stała Boltzmanna.

W przyjętym modelu kamery zakłada się, że powierzchnie promieniujące charakteryzują się emisyjnością $\epsilon(\lambda)$, detektor charakteryzuje się czułością napięciową $R_v(\lambda)$ lub czułością prądową $R_i(\lambda)$ i odbiera promieniowanie w paśmie $\Delta\lambda \in (\lambda_1, \lambda_2)$. Dla takich założeń egzytancje energetyczne powierzchni modelu są określone wzorem:

$$M_X(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_X(\lambda) M_\lambda(T) d\lambda, \quad (17)$$

W takim przypadku wzory (13), (14) i (15) przyjmują postać:

$$\Phi_{L-dD} = A_D F_{dD-L} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_L(\lambda) M_\lambda(T_L) d\lambda, \quad (18)$$

$$\Phi_{S-dD} = A_D F_{dD-S} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_S(\lambda) M_\lambda(T_S) d\lambda, \quad (19)$$

$$\Phi_{P-dD} = A_D F_{dD-P} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_P(\lambda) M_\lambda(T_P) d\lambda. \quad (20)$$

W celu wyrażenia mocy odbieranej przez detektor w liczbie elektronów (ładunków elementarnych) na sekundę należy zastosować wzory:

$$E_L = A_D F_{dD-L} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_L(\lambda) \frac{M_\lambda(T_L)}{q_e} R_i(\lambda) d\lambda, \quad (21)$$

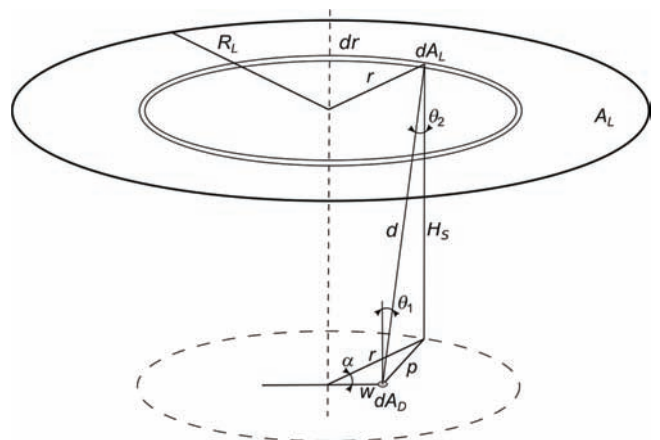
$$E_S = A_D F_{dD-S} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_S(\lambda) \frac{M_\lambda(T_S)}{q_e} R_i(\lambda) d\lambda, \quad (22)$$

$$E_P = A_D F_{dD-P} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_P(\lambda) \frac{M_\lambda(T_P)}{q_e} R_i(\lambda) d\lambda, \quad (23)$$

$$E_{tot} = E_L + E_P + E_S, \quad (24)$$

gdzie q_e to ładunek elektronu (ładunek elementarny) [C], a $R_i(\lambda)$ czułość prądowa [A/W].

Jednym z parametrów decydujących o mocy odbieranej przez detektor energii jest współczynnik konfiguracji. Współczynnik konfiguracji dla powierzchni okna wejściowego sprowadza się do określenia wymiany energii między powierzchnią dA_D (detektorem) o skończonych wymiarach i powierzchnią A_L (okna wejściowego) o skończonych wymiarach. Powierzchnia A_L jest kołem o promieniu R_L położonym równoległe, w odległości H_S od powierzchni dA_D . Wzajemne zależności między powierzchniami zostały przedstawione na rys. 6.



Rys. 6. Zależności geometryczne dla przeniesienia promieniowania między powierzchnią dA_D o dyskretnych wymiarach, a równoległą powierzchnią A_L o skończonych wymiarach w kształcie koła
Fig. 6. Geometric dependencies for the radiation transfer between the surface dA_D with discrete dimensions and the parallel surface A_L with finite dimensions in the shape of a circle

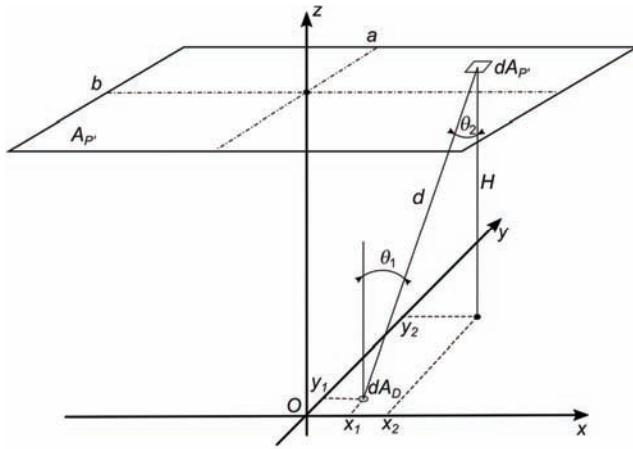
Z założeń oraz konstrukcji i zależności geometrycznych przedstawionych na rys. 6 wynika, że rozwiązaniem analitycznym dla tego przypadku jest wzór (25) [4]:

$$F_{dD-W} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{Z_w - 2R_w^2}{\sqrt{(Z_w^2 - 4R_w^2)}} \right], \quad (25)$$

gdzie:

$$H_w = \frac{H_S}{w}, \quad R_w = \frac{R_L}{w}, \quad Z_w = 1 + R_w^2 + H_w^2. \quad (26)$$

Następnym ważnym parametrem modelu jest współczynnik konfiguracji dla powierzchni obudowy obiektywu. W tym przypadku wymiana energii zachodzi między powierzchnią dA_D o dyskretnych wymiarach i powierzchnią A_P o skończonych wymiarach. Powierzchnia A_P jest prostokątem o wymiarach a i b położonym równoległe, w odległości H od powierzchni dA_D . Wzajemne zależności między powierzchniami zostały przedstawione na rys. 7.



Rys. 7. Zależności geometryczne dla przenoszenia promieniowania między powierzchnią dA_D o dyskretnych wymiarach a równoległą powierzchnią A_P o skończonych wymiarach w kształcie prostokąta Fig. 7. Geometric dependencies for the radiation transfer between the surface dA_D with discrete dimensions and the parallel surface A_P with finite dimensions in the shape of a rectangle

Jeżeli dla założeń oraz konstrukcji i zależności geometrycznych przedstawionych na rys. 7 przyjmujemy, że:

$$x_2 \in \langle 0, a \rangle, \quad y_2 \in \langle 0, a \rangle, \quad x_1 = 0, \quad y_1 = 0,$$

to wówczas rozwiązaniem analitycznym dla tego przypadku jest wzór (27) [4]:

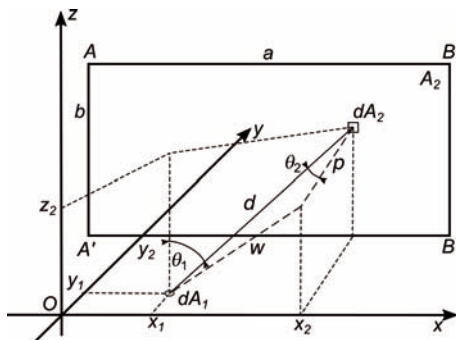
$$F_{dD-P'} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{A_w}{\sqrt{1+A_w^2}} \arctan W_b + \frac{B_w}{\sqrt{1+B_w^2}} \arctan W_a \right], \quad (27)$$

gdzie:

$$A_w = \frac{a}{H}, \quad B_w = \frac{b}{H}, \quad W_b = \frac{B_w}{\sqrt{1+A_w^2}}, \quad W_a = \frac{A_w}{\sqrt{1+B_w^2}}. \quad (28)$$

W rzeczywistości powierzchnia czołowa przesłony jest prostokątem z „wyciętym” miejscem na okno wejściowe. W związku z tym powierzchnia czołowa przesłony wynosi $A_P = A_P' - A_L$, zaś współczynnik konfiguracji ma wartość $F_{dD-P} = F_{dD-P'} - F_{dD-L}$.

Ostatnim ważnym parametrem modelu jest współczynnik konfiguracji dla powierzchni bocznej przesłony detektora, która ta składa się w czterech prostokątów. Dla każdego prostokąta wymiana energii zachodzi między powierzchnią dA_1 o dyskretnych wymiarach i powierzchnią A_2 o skończonych wymiarach. Powierzchnia A_2 jest prostokątem o wymiarach a i b położonym prostopadle względem powierzchni dA_1 wzdłuż osi OY . Wzajemne zależności między powierzchniami zostały przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Zależności geometryczne dla przenoszenia promieniowania między powierzchnią dA_1 o dyskretnych wymiarach a prostopadłą powierzchnią A_2 o skończonych wymiarach w kształcie prostokąta Fig. 8. Geometric dependencies for the radiation transfer between the surface dA_1 with discrete dimensions and the perpendicular surface A_2 with finite dimensions in the shape of a rectangle

Jeżeli dla założeń oraz konstrukcji i zależności geometrycznych przedstawionych na rys. 8 przyjmujemy, że:

$$c = y_2 = \text{const}, \quad x_2 \in \langle 0, a \rangle, \quad z_2 \in \langle 0, b \rangle,$$

to wówczas rozwiązaniem analitycznym dla tego przypadku jest wzór (29) [4]:

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\arctan \left(\frac{1}{C_w} \right) - \frac{C_w}{Y_w} \arctan \left(\frac{1}{Y_w} \right) \right], \quad (29)$$

gdzie:

$$A_w = \frac{a}{b}, \quad C_w = \frac{c}{b}, \quad Y_w = \sqrt{A_w^2 + C_w^2}. \quad (30)$$

W prezentowanym modelu powierzchnia boczna przesłony to powierzchnia boczna prostopadłościanu składająca się z czterech powyżej zdefiniowanych prostokątów.

3. Wyniki symulacji

Parametry modelu obudowy detektora oraz matrycy detektorów podczerwieni przyjęte do symulacji zostały przedstawione w tabeli 1. W symulacji przyjęto dwie sytuacje dla dwóch różnych otworów względnych $F_{\#} = 2,0$ i $F_{\#} = 4,0$, wyznaczonych zgodnie ze wzorem:

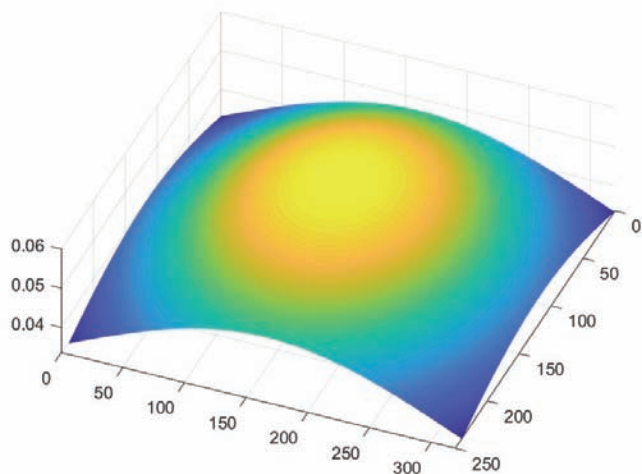
$$F_{\#} = \frac{2R_L}{H_S}. \quad (31)$$

Tabela 1. Podstawowe parametry modelu obudowy detektora oraz matrycy detektorów

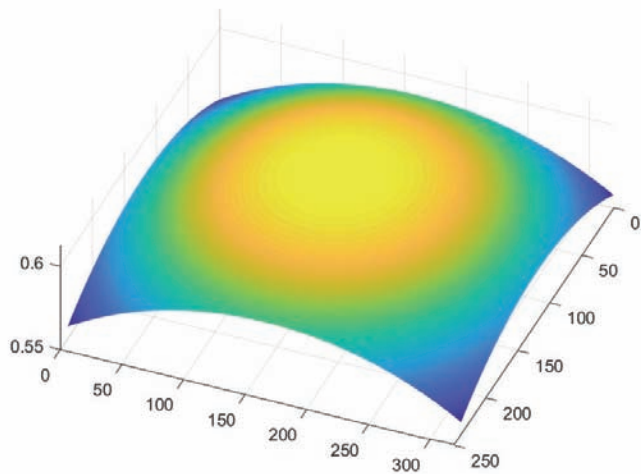
Table 1. Basic parameters of the detector housing model and the detector array

Parametr	Wartość
Szerokość detektora	30 μm
Wysokość detektora	30 μm
Rozdzielczość matrycy detektorów	320 \times 240
Szerokość matrycy detektorów	9,60 mm
Wysokość matrycy detektorów	7,20 mm
Zakres widmowy	3–5 μm
R_L	2,50 mm dla $F_{\#} = 2,0$
	1,25 mm dla $F_{\#} = 4,0$
H_S	10,00 mm
a	24,60 mm
b	22,20 mm

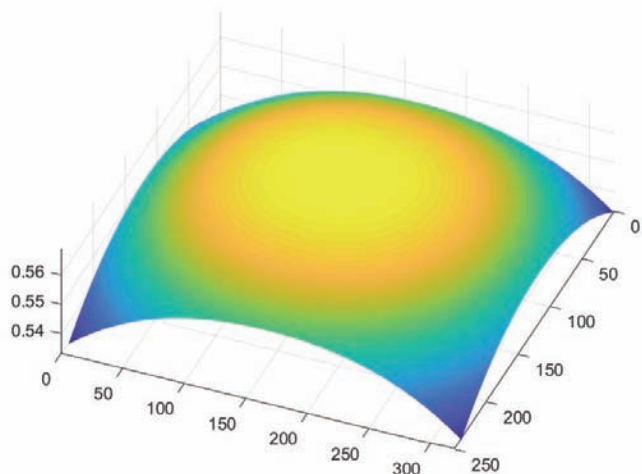
Dla wszystkich modeli przyjęto następujące wspólne założenia:
 – wszystkie powierzchnie promieniujące nie odbijają promieniowania, czyli współczynnik odbicia jest równy zero – $\rho(\lambda) = 0$,
 – wszystkie powierzchnie przesłony są nieprzezroczyste, czyli współczynnik transmisji jest równy zero – $\tau(\lambda) = 0$ oraz emisyjność jest równa jeden – $\epsilon(\lambda) = 1$,
 – powierzchnia okna wejściowego jest całkowicie przezroczysta i niepochlaniająca (nieemitująca) promieniowania – $\epsilon(\lambda) = 0$, $\tau(\lambda) = 1$, $\rho(\lambda) = 0$.



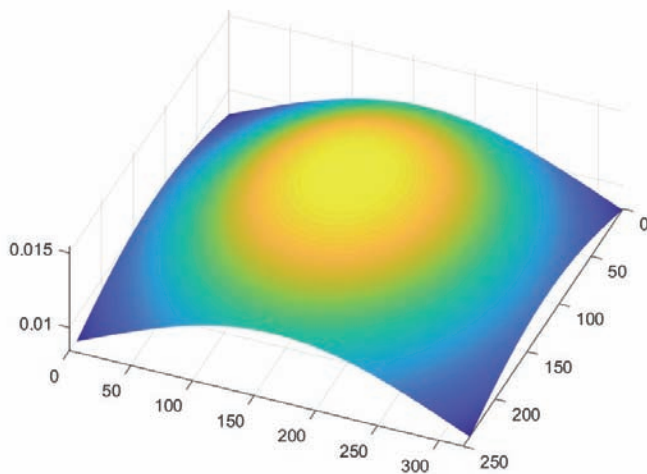
Rys. 9. Wartości współczynników konfiguracji detektorów matrycy dla powierzchni okna wejściowego L od strony detektora D ($F_{\#} = 2,0$)
 Fig. 9. Values of configuration coefficients for the entrance window area L from the detector side D ($F_{\#} = 2.0$)



Rys. 12. Wartości współczynników konfiguracji detektorów matrycy D dla powierzchni czołowej P przesłony ($F_{\#} = 4,0$)
 Fig. 12. Values of the configuration coefficients of the detector array D to the entrance face surface P ($F_{\#} = 4.0$)



Rys. 10. Wartości współczynników konfiguracji detektorów matrycy D dla powierzchni czołowej P przesłony ($F_{\#} = 2,0$)
 Fig. 10. Values of the configuration coefficients of the detector array D to the entrance face surface P ($F_{\#} = 2.0$)



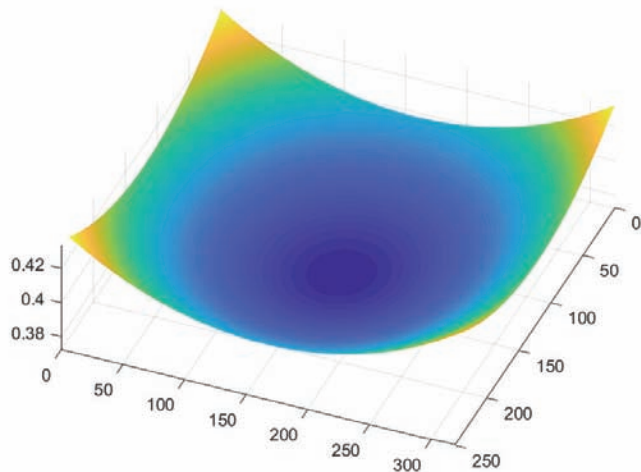
Rys. 11. Wartości współczynników konfiguracji detektorów matrycy dla powierzchni okna wejściowego L od strony detektora D ($F_{\#} = 4,0$)
 Fig. 11. Values of configuration coefficients for the entrance window area L from the detector side D ($F_{\#} = 4.0$)

Tabela 2. Maksymalny ładunek w jednostce czasu [Me⁻/s] odbierany z danej powierzchni dla różnych temperatur – $F_{\#} = 2,0$
 Table 2. Maximum charge per unit time [Me⁻/s] received from a given surface for different temperatures – $F_{\#} = 2.0$

T, °C	E_s	E_L	E_P	E_{tot}
-80	5,84e+01	7,93e+00	7,66e+01	1,43e+02
-70	1,32e+02	1,80e+01	1,74e+02	3,24e+02
-60	2,78e+02	3,78e+01	3,65e+02	6,81e+02
-50	5,50e+02	7,47e+01	7,22e+02	1,35e+03
-40	1,03e+03	1,40e+02	1,35e+03	2,52e+03
-30	1,83e+03	2,48e+02	2,40e+03	4,48e+03
-20	3,12e+03	4,23e+02	4,09e+03	7,64e+03
-10	5,12e+03	6,95e+02	6,72e+03	1,25e+04
0	8,11e+03	1,10e+03	1,06e+04	1,99e+04
10	1,25e+04	1,69e+03	1,64e+04	3,05e+04
20	1,86e+04	2,53e+03	2,45e+04	4,57e+04
30	2,72e+04	3,69e+03	3,57e+04	6,66e+04
40	3,88e+04	5,27e+03	5,09e+04	9,50e+04
50	5,42e+04	7,35e+03	7,11e+04	1,33e+05
60	7,42e+04	1,01e+04	9,75e+04	1,82e+05

W wyniku przeprowadzonych symulacji wyznaczono współczynniki konfiguracji dla powierzchni emitujących modelu. Przykładowe współczynniki konfiguracji dla $F_{\#} = 2,0$ oraz $F_{\#} = 4,0$, zostały przedstawione na rysunkach 9–13.

Dla obu przypadków otworów względnych $F_{\#} = 2,0$ i $F_{\#} = 4,0$ zostały wyznaczone maksymalne wartości ładunku w jednostce czasu [Me⁻/s] generowanego przez detektor na skutek promieniowania danej powierzchni dla różnych temperatur. Wartości zostały przedstawione w tabelach 2 i 3.



Rys. 13. Wartości współczynników konfiguracji detektorów matrycy D dla powierzchni bocznej S przesłony detektora ($F_{\#} = 2,0$ i $F_{\#} = 4,0$)
Fig. 13. Values of the configuration coefficients of the detector array D to the side S of the housing ($F_{\#} = 2.0$ and $F_{\#} = 4.0$)

Tabela 3. Maksymalny ładunek w jednostce czasu [Me-/s] odbierany z danej powierzchni dla różnych temperatur – $F_{\#} = 4,0$

Table 3. Maximum charge per unit time [Me-/s] received from a given surface for different temperatures – $F_{\#} = 4.0$

T, °C	E_S	E_L	E_P	E_{tot}
-80	5,84e+01	2,07e+00	8,25e+01	1,43e+02
-70	1,32e+02	4,69e+00	1,87e+02	3,24e+02
-60	2,78e+02	9,88e+00	3,93e+02	6,81e+02
-50	5,50e+02	1,95e+01	7,77e+02	1,35e+03
-40	1,03e+03	3,65e+01	1,45e+03	2,52e+03
-30	1,83e+03	6,50e+01	2,59e+03	4,48e+03
-20	3,12e+03	1,11e+02	4,41e+03	7,64e+03
-10	5,12e+03	1,82e+02	7,23e+03	1,25e+04
0	8,11e+03	2,88e+02	1,15e+04	1,99e+04
10	1,25e+04	4,43e+02	1,76e+04	3,05e+04
20	1,86e+04	6,62e+02	2,64e+04	4,57e+04
30	2,72e+04	9,66e+02	3,84e+04	6,66e+04
40	3,88e+04	1,38e+03	5,48e+04	9,50e+04
50	5,42e+04	1,92e+03	7,65e+04	1,33e+05
60	7,42e+04	2,64e+03	1,05e+05	1,82e+05

Tabela 4. Wybrane parametry układów odczytu ROIC

Table 4. Chosen parameters of the ReadOut Integrated Circuits (ROIC)

Parametr	ISC9705	MT3230DA
Pojemność kondensatora całkującego	18 Me	10 Me
Szumy układu ROIC	870 e ⁻ (dla 50–300 K)	600 e ⁻ (dla 77 K)
Czas integracji	5,1 μs – 200 ms	1 μs – 1 s

4. Podsumowanie

Układy odczytu z wstrzykiwaniem ładunku DI cechują się występowaniem kondensatora całkującego [2, 6], który jest ładowany w czasie cyklu pomiarowego – procesu całkowania. Wielkość zgromadzonego ładunku kondensatora zależy od fotoprądu detektora (wywołanego padającym promieniowaniem), prądu ciemnego detektora (niezwiązanego z padającym promieniowaniem) oraz szumu występującego w układzie odczytu. W opracowaniu przyjęto, że dominujący wpływ na naładowanie kondensatora ma fotoprąd detektora. W związku z tym w analizie numerycznej pominięto wpływ prądu ciemnego detektora oraz szumu w układzie odczytu.

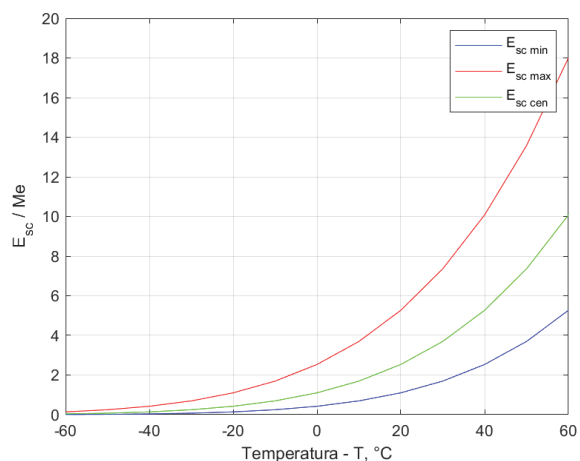
Fotoprąd detektora zależy od padającego na detektor promieniowania, które można podzielić na promieniowanie użyteczne (związane z obserwowaną sceną) oraz promieniowanie nieużyteczne (związane z promieniowaniem obudowy detektora i kamery). Oznacza to, że ładunek zgromadzony w kondensatorze całkującym można podzielić na ładunek użyteczny, odzwierciedlający moc promieniowania padającego ze sceny ($E_{SC} = E_L$) oraz ładunek nieużyteczny, związany z pozostałymi źródłami promieniowania ($E_h = E_P + E_S$). W symulacji przyjęto, że promieniowanie użyteczne to promieniowanie przechodzące przez okno wejściowe. Promieniowanie od pozostałych elementów modelu zostało uznane jako promieniowanie nieużyteczne.

Pojemność kondensatora całkującego w układzie ROIC ma skończoną, ściśle określoną wielkość [2, 6]. W tabeli 4 zostały przedstawione wybrane parametry układów odczytu FLIR ISC9705 firmy FLIR Systems [2] oraz MT3230DA firmy Mikro-Tasarim Elektronik [6].

Z analizy wyników symulacji dla opracowanych modeli wynika, że dla temperatury sceny i obudowy zbliżonej do 30 °C wartość gromadzonego ładunku wynosi około 66 600 Me-/s. Oznacza to, że dla czasu całkowania rzędu 1 ms ładunek zgromadzony w kondensatorze wynosi prawie 70 Me-. Uzyskana wartość ładunku dla takiego czasu całkowania jest od 3,7 do 6,6 razy większa niż pojemność kondensatora całkowania rzeczywistego układu odczytu [2, 6]. Sygnał użyteczny może być w takim układzie odczytany wiernie dla czasów integracji poniżej 140 μs.

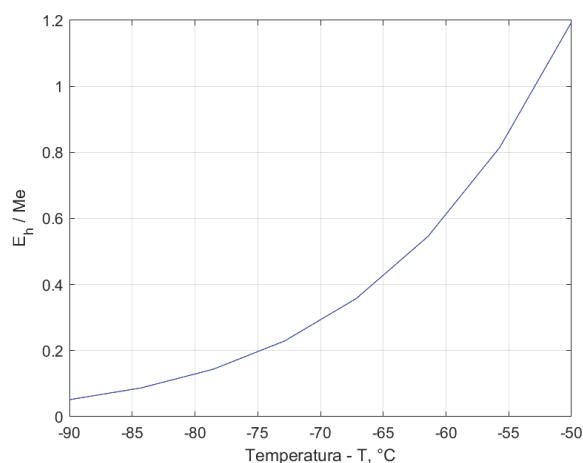
Zmniejszenia ilości energii docierającej ze sceny można dokonać przez zmniejszenie okna wejściowego. Jednocześnie spowoduje to zwiększenie mocy promieniowania docierającego do detektora od obudowy detektora (przesłony). Jednak w takim wypadku, jeżeli temperatura obudowy i elementów obserwowanej sceny jest podobna to sumaryczna moc docierająca do detektora (i wywołująca naładowanie kondensatora) nie zmieni się. W celu uzyskania zmniejszenia udziału ładunku kondensatora związanego z promieniowaniem obudowy należy obudowę chłodzić, czyli zastosować tzw. „zimną przysłonę”. W opracowaniu przeanalizowano zastosowanie „zmienniej” przesłony w dwóch wariantach dla liczby otworowej $F_{\#} = 2,0$ i $F_{\#} = 4,0$.

Na rysunku 14 przedstawiono wartość ładunku zgromadzonego na kondensatorze całkującym na skutek promieniowania użytecznego w funkcji temperatury sceny (wykres koloru zielonego) dla konstrukcji z „zimną” przysłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 2,0$. W tym przypadku przyjęto czas integracji (całkowania) równy $t_{int} = 1$ ms. Na wykresie zaznaczono maksymalną (wykres koloru czerwonego) i minimalną (wykres koloru niebieskiego) moc promieniowania użytecznego dla dynamiki obserwowanej sceny wynoszącej $\Delta T = 40$ °C. Wykres w kolorze czerwonym obrazuje moc promieniowania dla temperatury zwiększonej od nominalnej (wykres zielony) o 20 °C, zaś wykres w kolorze niebieskim obrazuje moc promieniowania dla temperatury zmniejszonej od nominalnej (wykres zielony) o 20 °C.



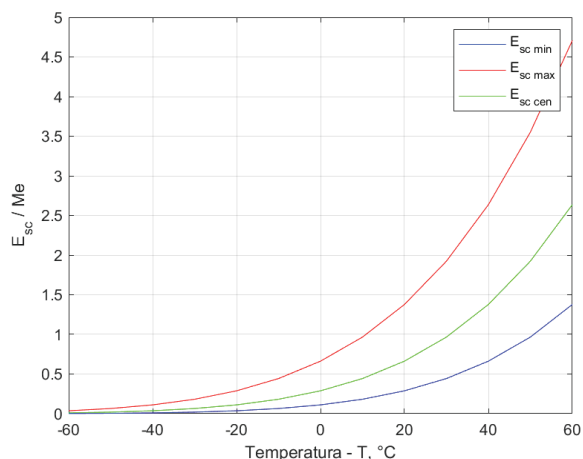
Rys. 14. Wykres ładunku gromadzonego przez kondensator całkujący w wyniku całkowania promieniowania użytecznego (z obserwowanej sceny) w funkcji temperatury sceny dla konstrukcji z „zimną” przesłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 2,0$

Fig. 14. The graph of the charge accumulated by the integrating capacitor as a result of the integration of useful radiation (from the observed scene) as a function of the scene temperature for a structure with a “cold” shield with a $F_{\#} = 2.0$



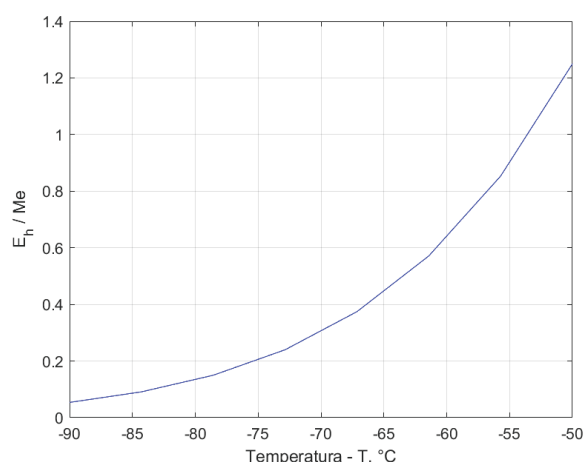
Rys. 15. Wykres ładunku gromadzonego przez kondensator całkujący w wyniku całkowania promieniowania nieużytecznego (przesłony) w funkcji temperatury przesłony dla konstrukcji z „zimną” przesłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 2,0$

Fig. 15. The graph of the charge accumulated by the integrating capacitor as a result of the integration of not useful radiation (from shield) as a function of the shield temperature for a structure with a “cold” shield with a $F_{\#} = 2.0$



Rys. 16. Wykres ładunku gromadzonego przez kondensator całkujący w wyniku całkowania promieniowania użytecznego (z obserwowanej sceny) w funkcji temperatury sceny dla konstrukcji z „zimną” przesłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 4,0$

Fig. 16. The graph of the charge accumulated by the integrating capacitor as a result of the integration of useful radiation (from the observed scene) as a function of the scene temperature for a structure with a “cold” shield with a $F_{\#} = 4.0$



Rys. 17. Wykres ładunku gromadzonego przez kondensator całkujący w wyniku całkowania promieniowania nieużytecznego (przesłony) w funkcji temperatury przesłony dla konstrukcji z „zimną” przesłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 4,0$

Fig. 17. The graph of the charge accumulated by the integrating capacitor as a result of the integration of not useful radiation (from shield) as a function of the shield temperature for a structure with a “cold” shield with a $F_{\#} = 4.0$

Na rysunku 15 przedstawiono moc promieniowania nieużytecznego (odbieranego z elementów obudowy – przesłony) wyrażoną w ładunku zgromadzonym na kondensatorze całkującym w funkcji temperatury obudowy dla konstrukcji z „zimną” przesłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 2,0$.

Na rysunkach 16 i 17 zostały przedstawione analogiczne wykresy dla konstrukcji z „zimną” przesłoną o liczbie otworowej $F_{\#} = 4,0$, czasie integracji (całkowania) równym $t_{int} = 1$ ms oraz dla dynamiki obserwowanej sceny wynoszącej $\Delta T = 40$ °C.

Z zaprezentowanych wyników modelowania i symulacji wynika, że w celu uzyskania detektora matrycowego cechującego się dużą dynamiką sygnału wyjściowego dobrze odwzorowującego zmianę promieniowania pochodzącego z obserwowanej sceny w konstrukcji detektora należy zastosować „zimną” przesłonę o liczbie otworowej równej $F_{\#} = 2,0$ lub większej.

Podziękowania

Badania współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu w ramach programu Unii Europejskiej Inteligentny Rozwój 2014–2020 5/1,1,1/2020 Szybka Ścieżka 5_2020 „KORONAWIRUSY”.

Bibliografia

1. Bieszczad G., Krupiński M., Madura H., Sosnowski T., *Thermal camera for autonomous mobile platforms*, [In:] Nawrat A., Kuś Z. (eds.), *Vision Based Systems for UAV Applications*, Heidelberg: Springer International Publishing, 2013, 95–114, DOI: 10.1007/978-3-319-00369-6_6.
2. FLIR ISC9705 LOW STANDARD 320, FLIR Systems, 2002:13.

3. Gross H., *Handbook of Optical Systems, Volume 1: Fundamentals of Technical Optics*, Wiley-VCH, 2005.
4. Howell J.R., *A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors*.
5. Howell J.R., Mengüç M.P., Siegel R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Boca Raton London New York: CRC Press, 2020, DOI: 10.1201/9780429327308.
6. MT3230DA 320 × 240 – 30 μm DI ROIC, Mikro-Tasarım Elektronik.
7. Song P., Ye Z., Hu W., Hu X., *Injection efficiency of DI and CTIA readout integrated circuit*, 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), IEEE, 2015, 81–82, DOI: 10.1109/NUSOD.2015.7292832.
8. Sosnowski T., Bieszczad G., Kastek M., Madura H., *Digital image processing in high resolution infrared camera with use of programmable logic device*, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 7838, 2010, DOI: 10.1117/12.865026.
9. Sosnowski T., Madura H., Bieszczad G., Kastek M., Chmielewski K., *Construction, parameters, and research results of thermal weapon sight*, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 8193, 2011, DOI: 10.1117/12.900867.
10. Vollmer M., Möllmann K.P., *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Weinheim, Germany: Wiley Blackwell, 2017.
11. Więcek B., De Mey G., *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*, Łódź: Wydawnictwo PAK, 2011.
12. Willers C.J., *Electro-Optical System Analysis and Design: A Radiometry Perspective*, SPIE, 2013, DOI: 10.1117/3.1001964.
13. Wolfe W.L., *Introduction to Radiometry*, SPIE Press, 1998.

Radiation Model of a Housing of Cooled Infrared Detector Array

Abstract: The infrared camera detects infrared radiation from the observed objects, its main element is the array of infrared detectors, which converts the received radiation into an electrical signal. The radiation sources recorded by the detector can be divided as useful, received from the observed scene, and useless received from such objects as the detector housing and lens elements. These unusable radiation sources have a significant impact on the design of the detector itself. The article presents a model of the detector housing and a quantitative analysis of the influence of various radiation sources on the effectiveness of radiation detection from the observed scene.

Keywords: infrared radiation, thermovision

dr inż. Tomasz Sosnowski

tsosnowski@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4082-8366

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów cyfrowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych i programowalnych w technice podczerwieni.



dr inż. Grzegorz Bieszczad

grzegorz.bieszczad@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8048-2609

Ukończył w 2008 r. Wojskową Akademię Techniczną na Wydziale Elektroniki. Stopień doktora otrzymał w 2012 r. Obecnie zajmuje się zagadnieniami związanymi z projektowaniem systemów cyfrowych, programowaniem mikroprocesorów i układów FPGA związanych z cyfrowym przetwarzaniem obrazu, w tym obrazów termicznych.



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.



prof. dr hab. inż. Henryk Madura

henryk.madura@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1557-1685

Specjalista w dziedzinie optoelektroniki, techniki podczerwieni i termowizji. Absolwent Wydziału Elektroniki WAT (1976). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1983 r., a stopień doktora habilitowanego w 1999 r. W latach 1991–1997 zastępca Komendanta Instytutu Optoelektroniki. Od 2000 r. profesor nadzwyczajny Wojskowej Akademii Technicznej, a od 2015 r. profesor zwyczajny. Opublikował ponad 190 artykułów i referatów konferencyjnych. Autor i współautor 24 wdrożeń i 14 patentów. Kierował 22 pracami badawczymi i był wykonawcą w 18 pracach.



dr Robert Strąkowski

robert.strakowski@p.lodz.pl
ORCID: 0000-0003-4972-2349

Jest absolwentem Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. W Katedrze Systemów Elektronicznych i Termografii prowadzi badania nad nową metodą korekcji sygnału z niechłodzonych detektorów bolometrycznych. Jego zainteresowania badawcze obejmują również zastosowania elektromagnetyzmu, metamateriałów, termowizji i sztucznych sieci neuronowych w medycynie i innych dziedzinach.



dr inż. Mariusz Felczak

felczak@p.lodz.pl
ORCID: 0000-0002-0079-1960

Tytuł magistra inżyniera elektroniki uzyskał na Politechnice Łódzkiej w 2002 r. Wcześniej prowadził badania do swojej pracy magisterskiej na temat pomiarów termicznych w elektronice na Wydziale Elektroniki i Systemów Informatycznych Uniwersytetu w Gandawie w Belgii. Od 2002 r. pracuje na Politechnice Łódzkiej. Stopień doktora uzyskał na Politechnice Łódzkiej w 2007 r. Jego zainteresowania badawcze obejmują modelowanie wymiany ciepła i masy w chłodzeniu elektroniki.

