

# Charakteryzacja termograficznego kanału skrytej komunikacji

Krzysztof Sawicki, Grzegorz Bieszczad, Tomasz Sosnowski, Mariusz Mścichowski

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę wyznaczania charakterystyki pojemności informacyjnej termograficznego kanału komunikacji skrytej zbudowanego z promiennika ciepła (technicznego ciała czarnego) oraz kamery termowizyjnej. Wyznaczone charakterystyki stanowią dodatkowo parametr opisujący te urządzenia w kontekście ich nieoczywistego zastosowania do transmisji danych.

**Słowa kluczowe:** termowizja, steganografia, pojemność informacyjna

## 1. Wprowadzenie

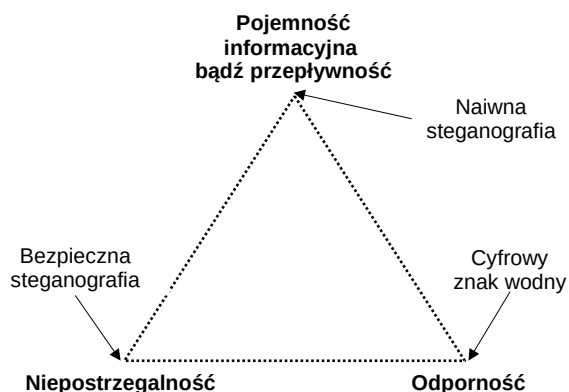
Przekazywanie informacji na odległość jest dzisiaj jednym z najbardziej palących problemów. Szybka i bezbłędna transmisja informacji to wymaganie stawiane wszystkim systemom telekomunikacyjnym, szczególnie tym o znaczeniu krytycznym. Szybki rozwój oraz powszechność cyfrowych systemów telekomunikacyjnych kładą silny nacisk na bezpieczeństwo przesyłanych danych. Typowym sposobem zapewnienia bezpieczeństwa transmisji jest kryptografia ale w niektórych, szczególnych przypadkach stosuje się podejście alternatywne – steganografię.

Steganografia to technika realizująca transmisję danych w sposób skryty. W przypadku steganografii kluczowym czynnikiem jest uczynienie transmisji „ukrytą”, tak aby nikt, kto nie jest uprawniony (poinformowany o szczegółach działania metody), nie był w stanie ujawnić faktu transmisji danych i, tym samym, jej odebrać. To podejście różni się od celu kryptografii, w której dane mogą być odbierane przez dowolnego odbiorcę, ale nie mogą być odszyfrowane bez znajomości klucza. W kryptografii to właśnie klucz i szyfrogram pozwalają na odzyskanie wiadomości. W steganografii to metoda transmisji, czyli sposób kodowania i nadawania danych, stanowią klucz do odzyskania informacji. W praktyce steganografia stosowana jest jako technika komplementarna do kryptografii, zapewniając dodatkową ochronę transmisji informacji.

Za pomocą steganografii można zrealizować tak zwane kanały skryte (ang. *covert channels*) — kanały komunikacyjne, w których dane są przesyłane w sposób skryty. Skryte kanały i ich wykorzystanie to popularny temat badawczy. Zasady tworzenia kanałów skrytych w łączach telekomunikacyjnych zostały opisane w 1989 r. [1].

Kanały skrytej transmisji można projektować na różne sposoby: wykorzystując nieużywane bity w nagłówkach protokołów sieciowych, modyfikując parametry zależne od czasu lub wykorzystując zjawiska, które w większości przypadków są traktowane jako niepożądane lub losowe. Wiele ukrytych kanałów zapewnia przepływność mniejszą niż dziesiątki bitów na sekundę [2]. Bardzo mały bitrate poprawia niedostrzegalność ukrytego kanału zgodnie z „magicznym trójkątem steganografii”. Kanał ukryty powinien być niezauważalny, odporny na zjawiska niepożądane i oferować dużą przepustowość (ang. *bitrate*). Reguła „magicznego trójkąta” mówi, że tylko dwie z tych cech mogą być osiągnięte, a trzecia cecha nie zostanie w pełni uzyskana (Rys. 1) [3, 4].

Istnieją wyrafinowane kanały komunikacji skrytej, które zapewniają przepływność rzędu dziesiątych części bitu na sekundę. Doskonałym przykładem takiego ukrytego kanału jest BitWhisper [5], w którym autorzy osiągnęli przepływność 8 bitów na godzinę ( $2,22 \cdot 10^{-3}$  bps). Tak niskie wartości uniemożliwiają wykorzystanie ukrytych kanałów do transmisji audio lub wideo, ale są wystarczające do sygnalizacji lub podstawowego sterowania urządzeniami. Ukryte kanały mogą być stosowane, gdy fakt obecności łączności powinien być utrzymywany w tajemnicy, na przykład, gdy czujniki umieszczone na teryto-



Rys. 1. „Magiczny trójkąt steganografii”  
Fig. 1. „The magic triangle of steganography”

### Autor korespondujący:

Krzysztof Sawicki, krzysztof.sawicki@wat.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 06.07.2023 r., przyjęty do druku 18.10.2023 r.



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

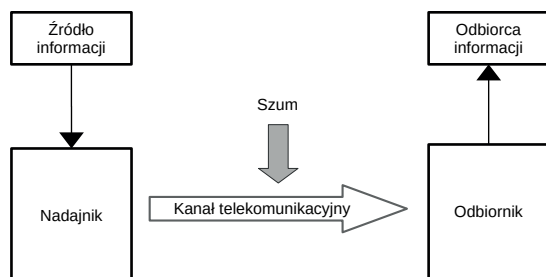
rium wroga lub na powszechnie używanych urządzeniach mają podwójną funkcję, gdzie drugorzędna funkcja ma być tajna. Komunikacja steganograficzna między czujnikami utrudnia ich odkrycie. Komunikacja steganograficzna może być również wykorzystywana w ramach tzw. trojanów sprzętowych.

Dzięki swoim cechom, kanały skryte umożliwiają wyciek informacji, zwłaszcza przez pokonanie tzw. szczeliny powietrznej (ang. *air gap*), czyli fizycznej bariery oddzielającej urządzenia, np. komputery, w których nie zastosowano zestawionego między nimi intencjonalnego kanału komunikacyjnego. Takie kanały wykorzystują poboczne zjawiska fizyczne, które nie są zjawiskami wykorzystywanymi do normalnej, jawnej komunikacji między urządzeniami. Mogą to być niejawne transmisje stosujące fale akustyczne z zakresu częstotliwości niesłyszalnych dla człowieka [6, 7], emisję niepożądanego promieniowania elektromagnetycznego [8, 9] a nawet sterowanie temperaturą elementów wewnętrznych komputera [5]. Istnieją również kanały komunikacji skrytej, w których korzysta się z termowizji [10] i zjawisk towarzyszących procesowi odczytu matrycy mikrobolometrycznej [11].

W artykule przedstawimy analizę teoretyczną kanału skrytej komunikacji, dla którego rolę nadajnika informacji będzie pełnił promiennik ciepła (techniczne ciało czarne), a rolę odbiornika detektor podczerwieni (kamera termowizyjna).

## 2. System telekomunikacyjny

Rozważmy teoretyczny system telekomunikacyjny złożony z nadajnika informacji, odbiornika oraz kanału telekomunikacyjnego. Jego elementy przedstawione są na Rys. 2.



Rys. 2. Uogólniony schemat systemu telekomunikacyjnego  
Fig. 2. Generalized diagram of the telecommunications system

Zakładając, że taki system jest systemem cyfrowym, to można opisać go dwoma parametrami:

- $B$  – szerokość pasma sygnału wyrażona w Hz,
- $C$  – pojemność informacyjna wyrażona w  $\frac{b}{s}$ .

Zależność między tymi dwoma parametrami została sformułowana w [12]:

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

gdzie  $\frac{S}{N}$  to wartość stosunku sygnału do szumu w odbiorniku.

Zakładając, że transmisja sygnału jest realizowana w paśmie podstawowym, określenie szerokości pasma sygnału w takim systemie jest możliwe przez ustalenie częstotliwości, dla której modul widmowej gęstości mocy odpowiedzi na wymuszenie w postaci impulsu jednostkowego spadnie o 3 dB poniżej swojej wartości maksymalnej. Widmowa gęstość mocy jest wynikiem transformaty Fouriera z funkcji autokorelacji odpowiedzi impulsowej (2).

$$\mathcal{P}(f) = \mathcal{F} \left( R(I(t)) \right) \quad (2)$$

W dalszej analizie używana będzie unormowana wartość modułu widmowej gęstości mocy  $\mathcal{P}_n(f)$ . Jako wartość odniesienia przyjęto maksymalną wartość modułu widmowej gęstości mocy (3).

$$\mathcal{P}_n(f) = \frac{|\mathcal{P}(f)|}{\max(|\mathcal{P}(f)|)} \quad (3)$$

### 2.1. System telekomunikacyjny oparty na promieniowaniu cieplnym

W teoretycznym systemie telekomunikacyjnym z liniowym kanałem telekomunikacyjnym nie rozważa się wzajemnych zależności między pasmem sygnału oraz stosunkiem sygnału do szumu. Rozpatrując system, w którym nadajnikiem informacji jest promiennik ciepła a odbiornikiem kamera termowizyjna, występuje jednak szereg zjawisk termodynamicznych i optycznych wpływających na właściwości systemu telekomunikacyjnego w sposób, który nie ma analogii w tradycyjnych technikach telekomunikacji radiowej i przewodowej. Obecność tych zjawisk powoduje, że taki system nie jest systemem liniowym i z tego powodu konieczny jest bardziej szczegółowy jego opis. Promiennik ciepła, np. techniczne ciało czarne, jest opisany charakterystyką narastania i opadania temperatury powierzchni promieniującej, która zależy od konstrukcji i doboru materiałów, z których ciało jest zbudowane, algorytmu sterowania temperaturą ciała i właściwościami elementu realizującego wymuszenie termiczne (zwykle grzałki oporowej lub modułu Peltiera). Od tej charakterystyki będzie zależała szerokość pasma nadajnika, a tym samym całego systemu. Kamera termowizyjna natomiast opisywana jest, między innymi przy pomocy parametru NETD, który może być traktowany jako miara szumu własnego kamery [13].

## 3. Metoda określania pasma

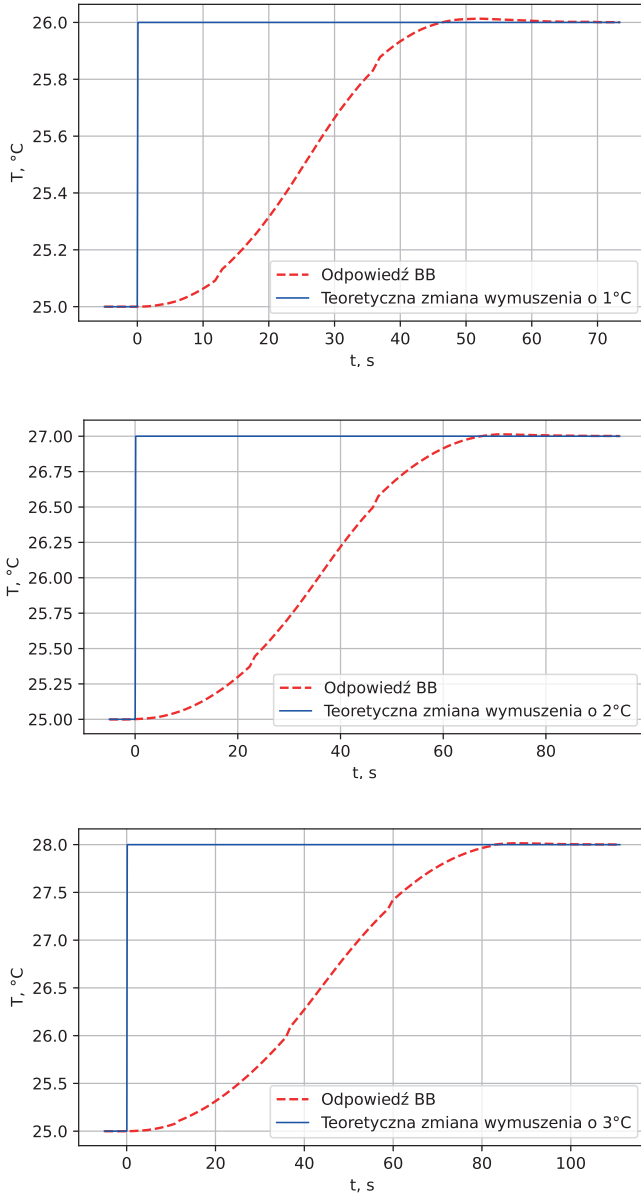
### 3.1. Charakterystyka nadajnika

W rzeczywistej implementacji nie istnieje techniczna możliwość zbadania charakterystyk częstotliwościowych nadajnika i odbiornika przy pomocy wymuszenia w postaci impulsu jednostkowego. Techniczne ciała czarne mają wewnętrzne kontrolery temperatury, które działają z pewnym opóźnieniem, często sięgającym dziesiątek sekund. Przykładowe odpowiedzi na wymuszenie skoku temperatury o 1 °C, 2 °C oraz 3 °C przedstawione zostały na rys. 3. Jak widać, sygnał rzeczywistej odpowiedzi wykazuje cechy przejścia przez układ filtra dolnoprzepustowego o wąskim paśmie przepustowym. W zależności od wartości skoku, ta charakterystyka może mieć inne nachylenie, a ciało czarne uzyska zadaną temperaturę po dłuższym czasie.

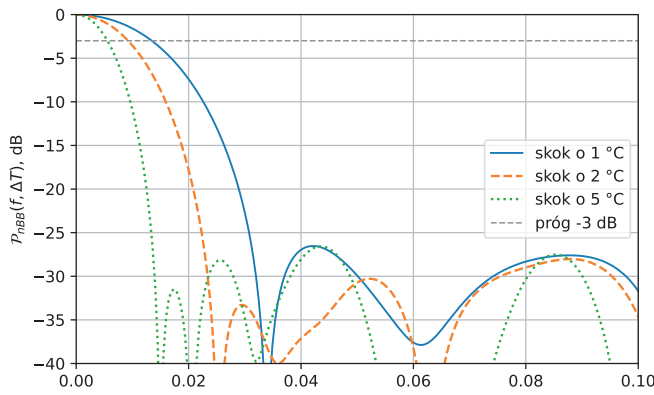
Korzystając z zależności teoretycznej między impulsem Diraca a skokiem jednostkowym, istnieje możliwość wyznaczenia pasma technicznego ciała czarnego dzięki analizie widmowej gęstości mocy, wyznaczonej z funkcji autokorelacji pochodnej odpowiedzi na skok jednostkowy  $\mathcal{P}_{BB}(f)$  oraz jej wartości unormowanej  $\mathcal{P}_{nBB}(f)$ :

$$\mathcal{P}_{BB}(f) = \mathcal{F} \left( R \left( \frac{dT(t)}{dt} \right) \right) \quad (4)$$

$$\mathcal{P}_{nBB}(f) = \frac{|\mathcal{P}_{BB}(f)|}{\max(|\mathcal{P}_{BB}(f)|)} \quad (5)$$



**Rys. 3. Przykładowe odpowiedzi technicznego ciała czarnego na zadane wymuszenia zmiany temperatury  $\alpha$ : a) 1 °C, b) 2 °C, c) 3 °C**  
 Fig. 3. Example technical blackbody response to temperature changes by: a) 1 °C, b) 2 °C, c) 3 °C



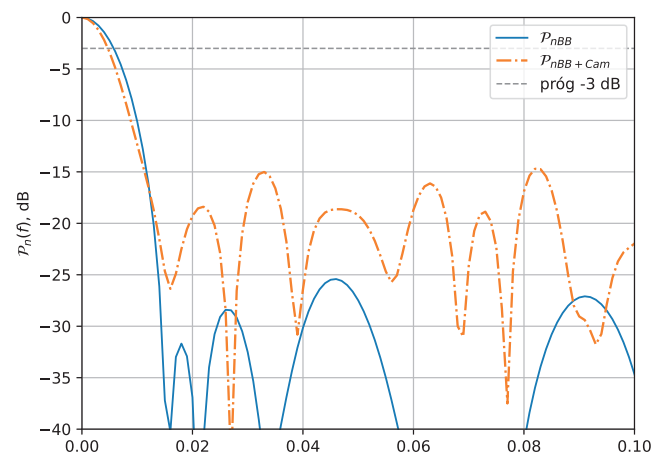
**Rys. 4. Przykładowe charakterystyki unormowanej widmowej gęstości mocy technicznego ciała czarnego dla trzech wartości skoku temperatury  $\Delta T$**   
 Fig. 4. Examples of normalized power spectral density of technical blackbody for three values of temperature changes  $\Delta T$

Techniczne ograniczenia i konstrukcja wewnętrzna sterownika ciała czarnego powodują, że szybkość narastania temperatury powierzchni ciała czarnego jest zależna od wartości zadanej zmiany. W związku z tym unormowana widmowa gęstość mocy ciała czarnego  $\mathcal{P}_{nBB}$  oraz jego pasmo  $B_{BB}$  są funkcjami wartości zadanej skoku  $\Delta T$ . Przykładowe charakterystyki  $\mathcal{P}_{nCam}$  dla różnych wartości  $\Delta T$  zostały przedstawione na Rys. 4.

### 3.2. Charakterystyka systemu

Określenie analogicznej charakterystyki unormowanej widmowej gęstości mocy kamery jako odbiornika –  $\mathcal{P}_{nCam}$  nie jest możliwe tą samą metodą, która stosowana jest przy określaniu tego parametru w technicznych ciałach czarnych. Ograniczenia pasma ciała czarnego nie pozwalają nam na wygenerowanie wymuszenia w postaci impulsu lub skoku jednostkowego. Istnieje natomiast techniczna możliwość zbadania charakterystyki unormowanej widmowej gęstości mocy całego systemu telekomunikacyjnego  $\mathcal{P}_{nCam+M+BB}$ , która uwzględni charakterystyki ciała czarnego (nadajnika), kamery termowizyjnej (odbiornika) oraz medium transmisyjnego (np. powietrza). W szczególnych przypadkach, kiedy nadajnik i odbiornik są umiejscowione blisko siebie, możemy wpływ medium transmisyjnego wyłączyć z dalszej analizy. Ponieważ ciało czarne ogranicza nam pasmo do niskich częstotliwości (ułamków Herza), można również przyjąć, że moduł transmitancji odbiornika dla tego zakresu częstotliwości jest bliski jedności:  $\mathcal{T}_{Cam} \approx 1$ . Założenie to jest słuszne dla kamer, w których nie zastosowano złożonych metod korekcji niejednorodności lub automatycznego przetwarzania obrazu. Analiza konstrukcji użytej w niniejszym eksperymencie kamery pozwala bezpiecznie takie założenie przyjąć, jednak dla przykładowego systemu, w którym korekcja niejednorodności odbywa się na podstawie analizy sygnału z obserwowanej sceny (np. [14]), takie założenie może nie być wystarczające.

Przykładowe unormowane charakterystyki widmowej gęstości mocy ciała czarnego  $\mathcal{P}_{nBB}$  oraz systemu  $\mathcal{P}_{nBB+Cam}$  przedstawione zostały na Rys. 5. Szerokości pasm: ciała czarnego  $B_{BB}$  oraz całego systemu  $B_{BB+Cam}$  wyznaczone na podstawie tej charakterystyki są do siebie zbliżone. Pozwala nam to stwierdzić, że głównym czynnikiem, który wpływa na szerokość pasma całego systemu  $B_{BB+Cam}$  jest promiennik ciepła (ciało czarne), czyli nadajnik użyty w analizowanym systemie telekomunikacyjnym.



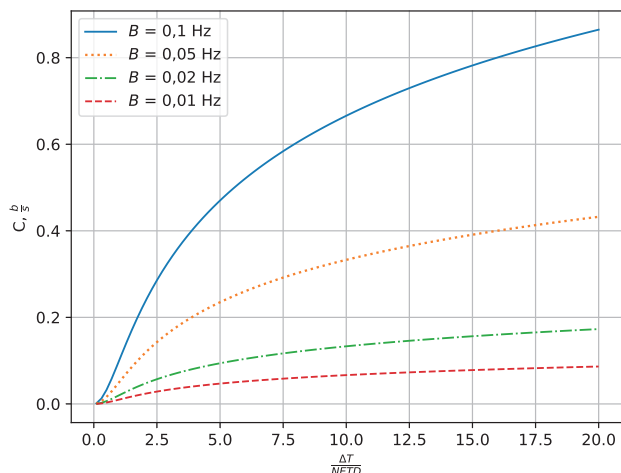
**Rys. 5. Unormowana widmowa gęstość mocy ciała czarnego oraz unormowana widmowa gęstość mocy całego systemu zarejestrowane dla wymuszenia  $\Delta T = 5 ^\circ\text{C}$**   
 Fig. 5. Normalized technical blackbody power spectral density and the normalized power spectral density of the entire system recorded for  $\Delta T = 5 ^\circ\text{C}$

### 3.3. Pojemność informacyjna systemu

Zgodnie ze wzorem (1) do obliczenia pojemności informacyjnej  $C_{BB+Cam}$  w rozważanym systemie telekomunikacyjnym konieczne jest poznanie wartości szerokości pasma systemu, wartości

mocy sygnału oraz mocy szumu. Przyjmując wartość  $NETD$  za amplitudę szumu, a wartość przyjętego skoku jednostkowego  $\Delta T$  za amplitudę sygnału uzyskujemy zależność (6), która dla kilku teoretycznych wartości szerokości pasma została wykreślona na Rys. 6. Uzyskiwane wartości pojemności informacyjnej systemu są mniejsze od 1 bita na sekundę. Transmisje realizowane w takim systemie cechuje zatem większa niepostrzegalność i odporność, zgodnie z Rys. 1.

$$C_{BB+Cam} = B_{BB+Cam} \cdot \log_2 \left( 1 + \left( \frac{\Delta T}{NETD} \right)^2 \right), \quad (6)$$



Rys. 6. Teoretyczna pojemność informacyjna systemu C  
Fig. 6. Theoretical channel capacity of the system

Zależność przedstawiona na Rys. 6 nie uwzględnia jednak tego, że szerokość pasma  $B_{BB+Cam}$  jest funkcją wartości skoku  $\Delta T$ , co oznacza, że pojemność informacyjna również jest od niej zależna. Uwzględniając wszystkie te zależności, wzór na pojemność informacyjną systemu przyjmuje postać (7).

$$C_{BB+Cam}(\Delta T, NETD) = B_{BB+Cam}(\Delta T) \cdot \log_2 \left( 1 + \left( \frac{\Delta T}{NETD} \right)^2 \right), \quad (7)$$

Ponieważ parametr  $B_{BB+Cam}$  jest parametrem indywidualnym dla każdego urządzenia i nie jest on podawany przez producentów technicznych ciał czarnych ani kamer termowizyjnych, to wyznaczenie zależności pojemności informacyjnej  $C$  kanału od

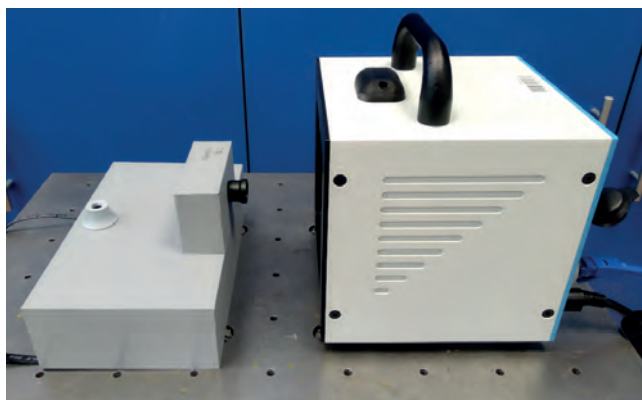
$\frac{\Delta T}{NETD}$  oraz  $B_{BB+Cam}$  jest możliwe na podstawie pomiaru w konkretnej realizacji.

#### 4. Wyznaczanie charakterystyki pojemności informacyjnej systemu w rzeczywistym układzie

W celu wyznaczenia charakterystyki  $C_{BB+Cam}(\Delta T, NETD)$  zbudowano system składający się z technicznego ciała czarnego o zakresie temperatur  $T \in (15^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C})$  i dokładności ustawiania temperatury  $\Delta T_{\min} = 0,01^\circ\text{C}$  oraz kamery termowizyjnej z matrycą mikrobolometryczną o rozdzielczości  $80 \times 80$  px (Rys. 7). Dla kamery termowizyjnej wyznaczono wartość  $NETD$ , która wynosi 120 mK (dla  $T = 25^\circ\text{C}$ ). Kamera oddalona była od powierzchni promieniującej ciała czarnego o 10 cm, co gwarantowało pełne pokrycie pola obserwacji kamery powierzchnią promieniującą ciała czarnego (Rys. 8).



Rys. 7. Użyta do wyznaczania charakterystyki pojemności informacyjnej kamera mikrobolometryczna bez obudowy  
Fig. 7. Microbolometrics thermal camera used without housing to determine channel capacity characteristics



Rys. 8. Zestawiony badany system telekomunikacyjny – kamera termowizyjna (w obudowie) oraz techniczne ciało czarne  
Fig. 8. The tested telecommunications system – the thermal camera (in the housing) and the technical blackbody

Dokonano rejestracji odpowiedzi kamery termowizyjnej dla wymuszeń ciała czarnego  $\Delta T \in (0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 10,0)^\circ\text{C}$ , a temperatura ciała czarnego, od której wymuszenie się zaczynało wynosiła  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ . Podczas pomiaru rejestrowano wartość cyfrową odpowiedzi z kamery termowizyjnej oraz temperaturę mierzoną kontaktowo, raportowaną przez techniczne ciało czarne.

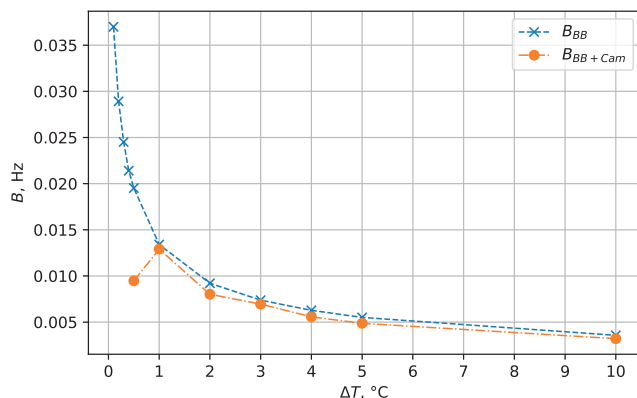
Na podstawie tych pomiarów wyznaczono charakterystyki:

- $B_{BB}(\Delta T)$  – szerokość pasma odpowiedzi ciała czarnego w funkcji wartości skoku,
- $B_{BB+Cam}(\Delta T)$  – szerokość pasma odpowiedzi ciała czarnego rejestrowanej przez kamerę w funkcji wartości skoku,
- $C_{BB+Cam}(\Delta T)$  – pojemność informacyjną systemu w funkcji wartości skoku, przy założeniu  $NETD = 120$  mK.

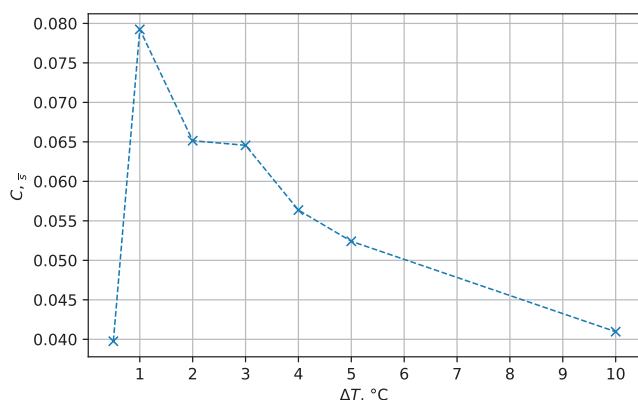
Na Rys. 9 przedstawiona została charakterystyka pasma  $B$  od wartości skoku  $\Delta T$  zmierzonego dla samego ciała czarnego ( $B_{BB}$ ) oraz dla całego systemu ( $B_{BB+Cam}$ ). Charakterystyki w większości swojego zakresu się pokrywają. Jedynie dla najmniejszych wartości  $\Delta T$  (mniejszych od  $0,5^\circ\text{C}$ ) nie było możliwości wyznaczenia pasma z powodu zbyt małego stosunku sygnału do szumu oraz długiego czasu rejestracji, w której ujawniała się obecność szumów typu  $1/f$  typowego dla kamery termowizyjnej. Również z tego powodu pasmo  $B_{BB+Cam}$  dla wartości  $\Delta T = 0, 5^\circ\text{C}$  jest dużo mniejsze od odpowiadającej wartości  $B_{BB}$ .

Wylczone pojemności informacyjne systemu telekomunikacyjnego przedstawiono w tabeli 1 oraz na Rys. 10. Wyraźnie widać optymalną wartość  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ , przy której pojemność informacyjna całego systemu jest największa i wynosi  $C_{BB+Cam} = 0,0792$  bps.





Rys. 9. Charakterystyka pasma B w funkcji wartości skoku  $\Delta T$   
Fig. 9. Characteristics of the bandwidth B as a function of the temperature change  $\Delta T$



Rys. 10. Charakterystyka pojemności informacyjnej systemu CBB+Cam w funkcji wartości skoku  $\Delta T$   
Fig. 10. Characteristics of the system's channel capacity CBB+Cam as a function of the temperature change  $\Delta T$

## 5. Podsumowanie

System telekomunikacyjny zbudowany z promiennika ciepła i detektora podczerwieni w postaci technicznego ciała czarnego oraz kamery termowizyjnej jest nieoczywistym sposobem na wykorzystanie funkcji tych urządzeń. Zarówno techniczne ciała czarne, jak i kamery termowizyjne są budowane do innych, odbiegających od przedstawionego zastosowania, celów. Jednak należy mieć na uwadze, że użycie tak nieoczywistego sposobu transmisji danych może być wygodne w różnych, specyficznych sytuacjach. Przedstawiona analiza dotyczyła technicznego ciała czarnego oraz kamery termowizyjnej, ale nic nie stoi na przeszkodzie, aby jako nadajnik mogło służyć dowolne urządzenie, którego działanie powoduje możliwe do kontrolowania zmiany natężenia promieniowania termicznego. Równie dobrze zamiast kamery termowizyjnej może być użyty np. pirometr. Nawet w takim przypadku będzie możliwe przesyłanie danych na odległość.

Przedstawiona w artykule metoda wyznaczania charakterystyki pojemności informacyjnej w funkcji wartości skoku temperatury ciała czarnego jest ogólną metodą, która może być zastosowana do badania systemów telekomunikacyjnych działających na podobnej zasadzie, ale zbudowanych na dowolnych elementach podobnie funkcjonujących. Uzyskane wartości przepływności są wartościami granicznymi – przy tych parametrach nie jest fizycznie możliwe uzyskanie większej pojemności informacyjnej. Należy pamiętać, że do faktycznego przesyłania danych konieczne jest również zdefiniowanie metody kodowania informacji, która będzie „świadoma” ograniczeń stawianych przez użyty sprzęt. Metoda kodowania zmniejszy efektywną przepływność stworzonego w ten sposób kanału.

Tabela 1. Pojemności informacyjne badanego systemu telekomunikacyjnego

Tab. 1. Channel capacity of the tested system telecommunications

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$C_{BB+Cam}, \frac{b}{s}$
0,2	0,0193
0,3	0,0342
0,4	0,0388
0,5	0,0398
1,0	0,0792
2,0	0,0651
3,0	0,0646
4,0	0,0564
5,0	0,0524
10,0	0,0410

Obecny stan wiedzy zna kilka metod steganograficznych, które polegają na „modulacji ciepła”. W [5] przebadano kanał skrytej komunikacji między dwoma komputerami i uzyskano przepływność 8 bitów na godzinę na odległości około 40 cm. Jest to wynik dużo mniejszy od wartości przedstawionych w tym artykule, ale wynikał on z faktu wymiany ciepła przez konwekcję, która jest znacznie wolniejsza od wymiany radiacyjnej badanej przez nas. W [15] dokonano zestawienia kanału skrytej komunikacji między sąsiadującymi rdzeniami procesora. W tym przypadku osiągnięto przepływność 12,5 bps. Jednak odległość transmisji była bardzo mała. Obie metody są uważane za jedne z najbardziej zaawansowanych metod steganograficznych, które mogą posłużyć do przeprowadzania ataków na systemy informatyczne.

Ponieważ pojawiają się kolejne systemy transmisji skrytej, konieczne jest opracowanie zestawu parametrów, które będą takie systemy opisywać. W przypadku systemów zbudowanych z technicznych ciał czarnych i kamer termowizyjnych będzie to charakterystyka pojemności informacyjnej w funkcji skoku temperatury i NETD kamery.

## Bibliografia

1. Wolf M., *Covert channels in LAN protocols*, “Local Area Network Security”, Springer, 1989, 89–101, DOI: 10.1007/3-540-51754-5\_33.
2. Mishra R., Bhanodiya P., *A review on steganography and cryptography*, 2015 International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications, IEEE, 2015, 119–122, DOI: 10.1109/ICACEA.2015.7164679.
3. Hamid N., Yahya A., Ahmad R.B., Al-Qershi O.M., *Image Steganography Techniques: An Overview*, “International Journal of Computer Science and Security”, Vol. 6, No. 3, 2012, 168–187.
4. Gribermans D., Jersovs A., Rusakovs P., *Development of requirements specification for steganographic systems*, “Applied Computer Systems”, Vol. 20, No. 1, 2016, 40–48, DOI: 10.1515/acss-2016-0014.
5. Guri M., Monitz M., Mirski Y., Elovici Y., *Bitwhisper: Covert signaling channel between air-gapped computers using thermal manipulations*, 2015 IEEE 28th Computer Security Foundations Symposium, IEEE, 2015, 276–289, DOI: 10.1109/CSF.2015.26.

6. Madhavapeddy A., Sharp R., Scott D., Tse A., *Audio networking: the forgotten wireless technology*, "IEEE Pervasive Computing", Vol. 4, No. 3, 2005, 55–60, DOI: 10.1109/MPRV.2005.50.
7. Hanspach M., Goetz M., *On covert acoustical mesh networks in air*, arXiv preprint arXiv:1406.1213, 2014.
8. Kuhn M.G., Anderson R.J., *Soft tempest: Hidden data transmission using electromagnetic emanations*, Springer, "Information Hiding", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1525, 1998, 124–142, DOI: 10.1007/3-540-49380-8\_10.
9. Guri M., Kedma G., Kachlon A., Elovici Y., *AirHopper: Bridging the air-gap between isolated networks and mobile phones using radio frequencies*, 2014 9th International Conference on Malicious and Unwanted Software: The Americas (MALWARE), IEEE, 2014, 58–67, DOI: 10.1109/MALWARE.2014.6999418.
10. Uzun C., Kahler N., De Peralta L.G., Kumar G., Bernussi A.A., *Programmable infrared steganography using photoinduced heating of nanostructured metallic glasses*, CLEO: Science and Innovations, Optica Publishing Group, 2017, DOI: 10.1364/CLEO\_AT.2017.JTh2A.95.
11. Sawicki K., Bieszczad G., Sosnowski T., *ThermoSteg-Covert Channel for Microbolometer Thermographic Cameras, "Sensors"*, Vol. 21, No. 19, 2021, DOI: 10.3390/s21196395.
12. Shannon C.E., *A mathematical theory of communication*, ACM SIGMOBILE "Mobile Computing and Communications Review", Vol. 5, No. 1, 2001, 3–55.
13. López-Alonso J.M., *Noise Equivalent Temperature Difference (NETD)*, "Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering" (Print)-Five Volume Set, CRC Press, 2015.
14. Bieszczad G.T., Sosnowski T.K., Sawicki K., Gogler S., Ligienza A., Mścichowski M., *A Network of Miniature Thermal Imaging Sensors for Object Detection and Tracking* [Sieć miniaturowych czujników termowizyjnych do wykrywania i śledzenia obiektów], "Pomiary Automatyka Robotyka", T. 25, Nr 4, 2021, 57–66, DOI: 10.14313/PAR\_242/57.
15. Masti R.J., Rai D., Ranganathan A., Müller C., Thiele L., Capkun S., *Thermal covert channels on multi-core platforms*, 24th USENIX Conference on Security Symposium, 2015, 865–880.
16. Marinetti S., Bison P., Grinzato E., Muscio A., *Thermal diffusivity measurement of stainless steel by periodic heating technique*, Proceedings of 5th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, 1999, 316–321.

## Characterization of Thermographic Covert Channel

**Abstract:** The paper presents a method for determining the characteristics of the information capacity of a thermographic covert communication channel made of a heat radiator (technical black body) and a thermal camera. The determined characteristics are an additional parameter describing these devices in the context of their non-obvious use for data transmission.

**Keywords:** termography, steganography, channel capacity

### 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.



### 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. Tomasz Sosnowski

tomasz.sosnowski@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 podczuwieni.



### Mariusz Mścichowski

mariusz.mscichowski@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.

