



ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD

585503 2. vydání Změna 1	STANOVENÍ MINIMÁLNÍHO ROZLIŠITELNÉHO TEPLOTNÍHO ROZDÍLU (MRTD) U INFRAČERVENÝCH ZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ
---	--

ZAVÁDÍ	Nezavádí žádnou normu nebo standard
NAHRAZUJE	ČOS 585503, 2. vydání STANOVENÍ MINIMÁLNÍHO ROZLIŠITELNÉHO TEPLOTNÍHO ROZDÍLU (MRTD) U INFRAČERVENÝCH ZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ

ČOS 585503
2. vydání
Změna 1

(VOLNÁ STRANA)

ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD
STANOVENÍ
MINIMÁLNÍHO ROZLIŠITELNÉHO TEPLOTNÍHO ROZDÍLU (MRTD)
U INFRAČERVENÝCH ZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ

Základem pro tvorbu tohoto standardu byl originál následujícího dokumentu:

STANAG 4350, Ed. 1 CALCULATION OF MINIMUM RESOLVABLE
 TEMPERATURE DIFFERENCE (MRTD)
 FOR THERMAL IMAGING SYSTEMS
Stanovení minimálního rozlišitelného teplotního rozdílu
(MRTD) u infračervených zobrazovacích systémů

© Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti

Praha 2021

OBSAH

	Strana
1 Předmět standardu.....	5
2 Nahrazení standardů (norem)	5
3 Související dokumenty	5
4 Zpracovatel ČOS.....	5
5 Použité zkratky, značky a definice	5
6 Výpočet MRTD pro systémy infračerveného zobrazování	6
6.1 Vzorce MRTD	6
6.2 Výpočet NETD (hodnota teplotního rozdílu ekvivalentní k šumu signálu)...	7
6.3 Normalizovaná šířka pásma šumu Δr	8
6.4 MTF – modulační přenosová funkce.....	8
7 Nedostatečné vzorkování a optický klam (chyba vzniklá vzorkováním)	14

1 Předmět standardu

ČOS 585503, 2. vydání, Změna 1, zavádí STANAG 4350, Edice 1, Stanovení minimálního rozlišitelného teplotního rozdílu (MRTD) u infračervených zobrazovacích systémů (Calculation of minimum resolvable temperature difference (MRTD) for thermal imaging systems), do prostředí ČR.

Tímto standardem se určují všeobecné technické požadavky k standardnímu stanovení a výpočtu MRTD, k hodnocení a porovnání infračervených zobrazovacích systémů.

2 Nahrazení standardů (norem)

Tento ČOS nahrazuje ČOS 585503, 2. vydání.

3 Související dokumenty

V tomto ČOS jsou normativní odkazy na následující citované dokumenty (celé nebo jejich části), které jsou nezbytné pro jeho použití. U odkazů na datované citované dokumenty platí tento dokument bez ohledu na to, zda existují novější vydání/edice tohoto dokumentu. U odkazů na nedatované dokumenty se používá pouze nejnovější vydání/edice dokumentu (včetně všech změn).

ČOS 585501 2. vydání	–	DEFINICE JMENOVITÉHO STATICKÉHO DOSAHU INFRAČERVENÝCH ZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ
ČOS 585502 2. vydání	–	MĚŘENÍ MINIMÁLNÍHO ROZLIŠITELNÉHO TEPLOTNÍHO ROZDÍLU (MRTD) U INFRAČERVENÝCH KAMER
Dokument NATO	–	OPTICAL TRANSFER FUNCTION MEASUREMENT OF IMAGING SYSTEMS (MĚŘENÍ FUNKCE OPTICKÉHO PŘENOSU ZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ)

4 Zpracovatel ČOS

Vojenský výzkumný ústav, s. p., Brno, Mgr. Adam Jobánek.

5 Použité zkratky, značky a definice

D_p^*	–	hodnota detektivity
f	–	ohnisková vzdálenost [mm]
MRTD	–	minimální rozlišitelný teplotní rozdíl
MTF	–	modulační přenosová funkce
NETD	–	hodnota teplotního rozdílu odpovídající šumu [K]
r	–	prostorová frekvence [mrad^{-1}]
λ	–	vlnová délka [μm]

6 Výpočet MRTD pro systémy infračerveného zobrazování

Úvodní pojednání o veličině MRTD je obsahem ČOS 585501, 2. vydání. Pro výpočet jmenovitého statického dosahu je potřeba určit horizontální MRTD ($MRTD_h$) a vertikální MRTD ($MRTD_v$).

6.1 Vzorce MRTD

$$MRTD_h(r) = \frac{\pi^2 \cdot k_T}{4 \cdot \sqrt{14}} \frac{r \cdot NETD}{MTF_h(r)} \left[\frac{DAS_v \cdot v_s \cdot \Delta r_{xh} \cdot \Delta r_{yh}}{t_e \cdot F_r \cdot \eta \cdot \Delta f_n} \right]^{1/2}$$

$$MRTD_v(r) = \frac{\pi^2 \cdot k_T}{4 \cdot \sqrt{14}} \frac{r \cdot NETD}{MTF_v(r)} \left[\frac{DAS_v \cdot v_s \cdot \Delta r_{xv} \cdot \Delta r_{yv}}{t_e \cdot F_r \cdot \eta \cdot \Delta f_n} \right]^{1/2}$$

kde

- k_T = prahový poměr signálu k šumu (= 2,25),
 DAS_v = vertikální zorné pole detektoru [mrad],
 v_s = úhlová rychlost snímání [mrad.s⁻¹],
 t_e = integrační doba oka (0,2 s),
 η = poměr překrytí zorného pole detektoru a vzdálenosti, mezi řádky,
 F_r = snímkový kmitočet [Hz],
NETD = hodnota teplotního rozdílu ekvival. k šumu signálu [K],
 Δf_n = ekvivalentní šumová šířka pásma [Hz],
 $\Delta r_{xh}, \Delta r_{yh}, \Delta r_{xv}, \Delta r_{yv}$ = normalizovaná šumová šířka pásma odpovídající jednomu proužku a orientaci ve směru osy x a y,
 MTF_h = horizontální modulační přenosová funkce (MTF),
 MTF_v = vertikální modulační přenosová funkce (MTF).

POZNÁMKA 1 V celém textu byl použit následující postup pro možnost výběru jednotek uvedených v hranatých závorkách: Stanoveným veličinám, na příklad Dp^* , byly ponechány jejich obvyklé jednotky, v tomto případě [$W^{-1} \cdot cm \cdot Hz^{1/2}$]. Zbývající jednotky v rovnicích byly vybrány tak, aby dávaly správné numerické výsledky.

6.2 Výpočet NETD (hodnota teplotního rozdílu ekvivalentní k šumu signálu)

$$\text{NETD} = \frac{4 \cdot F^2 \cdot (\Delta f_n)^{1/2}}{(ab)^{1/2} \cdot n_s^{1/2} \cdot \tau_0 \cdot M^*}$$

kde

F = F – clonové číslo objektivu = f / D,

D = průměr vstupní pupily objektivu [mm],

a, b = vertikální a horizontální rozměr detektoru [cm],

n_s = počet detektorů,

τ_0 = transmitance optického systému,

M^* = $\pi W D_p^*$ [Hz^{1/2} · cm⁻¹ · K⁻¹],

D_p^* = hodnota detektivitvity vztahující se ke chlazenému krytu detektoru pro dané F a teplotu pozadí [W⁻¹ · cm · Hz^{1/2}],

Δf_n = ekvivalentní šumová šířka pásma [Hz].

POZNÁMKA 2 Při určování NETD může Δf_n záviset také na kmitočtové charakteristice měřicího systému.

$$\Delta f_n = \int_0^{S_{\max}} \frac{S(f)}{S_{\max}} (\text{MTF}_N)^2 df$$

kde

S(f) = spektrální výkonová hustota šumu [V²Hz⁻¹],

S_{\max} = maximální hustota šumu pro frekvenci měření D_p^* [V²Hz⁻¹],

MTF_N = součin elektronických MTF: $\text{MTF}_{\text{el}} \cdot \text{MTF}_b$.

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} \cdot R_n(\lambda) d\lambda$$

kde

L(λ, T) = spektrální zářivost absolutně černého tělesa při teplotě T [W · cm⁻² · sr⁻¹ · μm⁻¹],

$R_n(\lambda)$ = normalizovaná spektrální citlivost detektoru.

6.3 Normalizovaná šířka pásma šumu Δr

Pro horizontální MRTD:

$$\Delta r_{xh}(r) = \frac{A}{r} \cdot \int_0^{\infty} \frac{S(g)}{S_{\max}} MTF_R^2(g) \cdot MTF_e^2(g) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{g}{2r}\right) dg$$

$$\Delta r_{yh}(r) = \frac{7}{r} \cdot \int_0^{\infty} MTF_{sc}^2(g) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{7g}{2r}\right) dg$$

Pro vertikální MRTD:

$$\Delta r_{xv}(r) = \frac{7}{r} \cdot \int_0^{\infty} \frac{S(g)}{S_{\max}} MTF_R^2(g) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{7g}{2r}\right) dg$$

$$\Delta r_{yv}(r) = \frac{A}{r} \cdot \int_0^{\infty} MTF_{sc}^2(g) \cdot MTF_e^2(g) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{g}{2r}\right) dg$$

kde

- g = integrační proměnná,
- A = normalizovaná konstanta (=1,75) k získání $\Delta r_x(r) = 1$ pro střední frekvence,
- S(g) = spektrální šumová hustota (N.B: $f = v_s \cdot r$),
- MTF_R = MTF zařízení ve směru snímání a za detektorem:
zpravidla MTF_{el} · MTF_b · MTF_m,
- MTF_{SC} = MTF zařízení kolmo ke směru snímání a za detektorem:
zpravidla MTF_{b,v} · MTF_m.

6.4 MTF – modulační přenosová funkce

6.4.1 MTF systému

MTF systému je součin MTF všech částí systému včetně lidského pozorovatele. Horizontální a vertikální MTF se liší, neboť hodnoty parametru mnoha komponentů se v různých směrech liší (např. velikost detektorů), nebo protože některé komponenty pracují pouze v jednom směru (např. elektronická MTF pouze ve směru snímání).

Pro infračervený zobrazovací systém platí:

- a) horizontální MTF je typicky dána následujícím vztahem:

$$MTF_h = MTF_{o,h} \cdot MTF_{d,h} \cdot MTF_i \cdot MTF_{el} \cdot MTF_{b,h} \cdot MTF_{m,h} \cdot MTF_e \cdot MTF_s \cdot MTF_{st,h} \cdot MTF_{D/A}$$

- b) vertikální MTF je typicky dána následujícím vztahem:

$$MTF_v = MTF_{o,v} \cdot MTF_{d,v} \cdot MTF_{b,v} \cdot MTF_{m,v} \cdot MTF_e \cdot MTF_{st,v}$$

kde

MTF_o = MTF přední části optického systému,

MTF_d = MTF detektoru,

MTF_i = MTF integrujících prvků,

MTF_{el} = MTF elektronických obvodů,

MTF_b = MTF zesílení kontrastu,

MTF_m = MTF displeje,

MTF_e = MTF oka,

MTF_s = MTF synchronizační chyby,

MTF_{st} = MTF stabilizační chyby,

$MTF_{D/A}$ = MTF převodníku D/A.

V následujících odstavcích jsou uvedeny vzorce a technické podmínky pro výpočet MTF často používaných komponentů. Tyto vzorce by se měly používat pouze tehdy, když nejsou k dispozici žádné specifické údaje o MTF.

6.4.2 MTF komponentů

A) MTF přední části optického systému MTF_o

a) Difrakčně omezený optický systém s kruhovou vstupní pupilou bez překážky:

$$MTF_o(r) = \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \arccos \left[\frac{\lambda \cdot r}{D} \right] - \frac{\lambda \cdot r}{D} \sqrt{1 - \left[\frac{\lambda \cdot r}{D} \right]^2} \right\}$$

kde

D = průměr vstupní pupily [mm].

U infračervených zobrazovacích systémů v oblasti spektra (8–12) μm nahradte $\lambda = 10 \mu\text{m}$.

U infračervených zobrazovacích systémů v oblasti spektra (3,0–5,5) μm nahradte $\lambda = 4,5 \mu\text{m}$.

U infračervených zobrazovacích systémů v oblasti spektra (3,0–4,2) μm nahradte $\lambda = 3,8 \mu\text{m}$.

b) Difrakčně omezený optický systém se středovou překážkou nebo s pravoúhlým otvorem:

Dle STANAG 4350 viz např. Lloyd, Thermal Imaging Systems, obr. 3.22 a 3.23.

c) MTF vyvolaná aberací:

$$MTF_{o,a} = (MTF_o)^q$$

kde

MTF_o = difrakčně omezená MTF,

q = aberační konstanta; $q > 1$.

B) MTF detektoru MTF_d

B.1) Diskrétní detektory

a) MTF respektující velikost detektoru:

U pravoúhlého (obdélníkového) detektoru:

$$MTF_{d,s}(r) = \frac{\sin(\pi \cdot r \cdot DAS)}{\pi \cdot r \cdot DAS}$$

kde

DAS = úhlová velikost detektoru v horizontálním nebo vertikálním směru [mrad].

b) MTF respektující okamžitou odezvu detektoru (pouze ve směru snímání):

$$MTF_{d,t}(r) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r \cdot v_{sc}}{f_{gr}}\right)^2}}$$

kde:

v_{sc} = rychlost snímání [$\text{mrad}\cdot\text{s}^{-1}$],

f_{gr} = mezní frekvence detektoru [Hz].

c) Když se do úvahy vezmou odpovídající hodnoty DAS v obou směrech, bude horizontální a vertikální MTF detektoru:

$$MTF_{d,h} = MTF_{d,s} \cdot MTF_{d,t}$$

$$MTF_{d,v} = MTF_{d,s}$$

B.2) Detektory SPRITE

a) MTF respektující velikosti detektoru:

$$MTF_{d,s}(r) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot r \cdot l}{f}\right)}{\frac{\pi \cdot r \cdot l}{f}}$$

kde

l = délka čtecí zóny nebo šířka detektoru [μm].

b) MTF respektující difuzní složku (pouze ve směru snímání):

$$MTF_{d,diff}(r) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot Q_a}{f} \right)^2}$$

kde

Q_a = difuzní délka [μm].

c) Když jsou dány odpovídající hodnoty MTF v obou směrech, bude horizontální a vertikální MTF detektoru:

$$MTF_{d,h} = MTF_{d,s} \cdot MTF_{d,diff}$$

$$MTF_{d,v} = MTF_{d,s}$$

C) MTF integrujících prvků MTF_i

U vzorkovaných systémů s omezenou dobou integrace pro každý vzorek (pouze ve směru snímání):

$$MTF_i(r) = \frac{\sin(\pi \cdot r \cdot t_i \cdot v_{sc})}{\pi \cdot r \cdot t_i \cdot v_{sc}}$$

kde

t_i = doba integrace pro každý vzorek [s],

v_{sc} = rychlost snímání [$\text{mrad} \cdot \text{s}^{-1}$].

V důsledku vzorkování může dojít k optickému klamu (viz kapitola 7).

D) MTF elektronických obvodů MTF_{el}

Tato MTF platí pouze ve směru snímání. Pro Butterworthův filtr typu dolní propust n-tého řádu je MTF:

$$MTF_{el}(r) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{r \cdot v_{sc}}{f_{gr}} \right)^{2n} \right]}}$$

kde

f_{gr} = mezní frekvence filtru (bod v úrovni poklesu -3dB) [Hz],

v_{sc} = rychlost snímání [$\text{mrad} \cdot \text{s}^{-1}$],

n = řád filtrů; $n = 1$: jediný RC – filtr.

E) MTF zvětšení kontrastu MTF_b

- a) Pokud se zvětšení kontrastu provádí analogovými obvody, funguje pouze ve směru snímání. MTF je možné popsat následovně:

$$MTF_b = 1 + \frac{K-1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi \cdot r}{r_b}\right) \right], \text{ pokud } r < 2r_b$$

$$MTF_b = 1, \text{ pokud } r > 2r_b$$

kde

K = koeficient zesílení (bezrozměrná veličina),

r_b = prostorová frekvence maximálního zesílení [mrad^{-1}].

- b) S digitálními obvody je možné používat zesílení kontrastu ve směru snímání i v kolmém na něj. Digitální zesílení kontrastu je možné také popsat pomocí MTF, která musí být vytvořena podle použitého algoritmu.

F) MTF převodníku D/A $MTF_{D/A}$

$$MTF_{D/A} = \frac{\sin^2(\pi \cdot r \cdot a_s)}{(\pi \cdot r \cdot a_s)^2}$$

kde

a_s = vzdálenost převodníku D/A pro daný vzorek, vztažená k velikosti objektu [mrad].

G) MTF displeje MTF_m

- a) LED displej

Je-li LED displej pravoúhlého formátu potom:

$$MTF_m(r) = \frac{\sin(\pi \cdot r \cdot \alpha_1)}{\pi \cdot r \cdot \alpha_1}$$

kde

α_1 = horizontální nebo vertikální rozměr LED ve vztahu k velikosti objektu [mrad].

- b) Displej CRT

Je-li profil obrazového bodu gaussovský, bude mít MTF následující tvar:

$$MTF_m(r) = \exp\left\{-2(\pi \cdot \sigma_c \cdot r)^2\right\}$$

kde

σ_c = standardní odchylka rozložení intenzity zobrazeného bodu ve vztahu k velikosti objektu [mrad].

POZNÁMKA 3 Pro kruhové body jsou horizontální a vertikální MTF stejné.

H) MTF oka MTF_e

$$MTF_e(r) = \exp\left\{-\frac{\left[\ln\left(\frac{r}{r_c}\right)\right]^2}{2 \cdot \sigma^2}\right\}$$

kde

$\sigma^2 = 0,85$,

r_c = prostorová frekvence vrcholové hodnoty MTF oka:

$$r_c = 0,055 \cdot \log L_d + 0,14 \quad [\text{mrad}]$$

L_d = jas displeje [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$]

normálně používaná hodnota $L_d = 100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ dá $r_c = 0,25 \text{ mrad}^{-1}$.

J) MTF chyby synchronizace rozkladu MTF_s

Tato MTF funguje pouze ve směru snímání:

$$MTF_s(r) = \exp\left[-2 \cdot (\pi \cdot \sigma_s \cdot r)^2\right]$$

kde

σ_s = standardní odchylka chyby synchronizace ve vztahu k velikosti objektu [mrad]

K) MTF chyby stabilizace MTF_{st}

$$MTF_{st}(r) = \exp\left[-2 \cdot (\pi \cdot \sigma_{st} \cdot r)^2\right]$$

kde

σ_{st} = standardní odchylka chyby stabilizace v horizontálním nebo vertikálním směru ve vztahu k velikosti objektu [mrad].

7 Nedostatečné vzorkování a optický klam (chyba vzniklá vzorkováním)

Pokud infračervený systém nedostatečně vzorkuje, není vždy MTF systému a tím i MRTD definována v celém rozsahu frekvencí (viz příloha dokumentu NATO: Měření funkce optického přenosu zobrazovacích systémů (Optical Transfer function Measurement of Imaging Systems)).

Zde se však předpokládá, že postup výpočtu pro MRTD je možno použít, jestliže účinky optického klamu, které vyplývají z nedostatečného vzorkování, nejsou na displeji zjevné.

Lze předpokládat, že se jedná o případ, kdy pro směry, v nichž dochází k diskrétnímu vzorkování, je signál optického klamu (viz níže) v pásmu užitečné prostorové frekvence (viz níže) menší než 20 % původní MTF systému (viz níže) a menší než 0,1.

Signál optického klamu je definován jako vstupní MTF zařízení (včetně objektivu, detektoru atd.), vychýlený zpět při vzorkovací frekvenci a vynásobený MTF rekonstrukce obrazu (elektroniky, displeje atd.).

Horní limit rozsahu užitečné prostorové frekvence je dán nejvyšší prostorovou frekvencí, která je potřebná ke splnění požadovaného úkolu.

Původní MTF systému je MTF systému, k níž by se došlo, kdyby nebylo přítomno žádné vzorkování.

(VOLNÁ STRANA)

Účinnost českého obranného standardu od: **27. listopadu 2017**

Změny:

Změna číslo	Účinnost od	Změnu zpracoval	Datum zpracování	Poznámka
1	24. 10. 2018.	Odbor obranné standardizace	24. 10. 2018	

Upozornění: Oznámení o českých obranných standardech jsou uveřejňována měsíčně ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví v oddíle „Ostatní oznámení“ a Věstníku MO.

V případě zjištění nesrovnalostí v textu tohoto ČOS zasílejte připomínky na adresu distributora.

Rok vydání: 2021, obsahuje 8 listů

Distribuce: Odbor obranné standardizace Úř OSK SOJ, nám. Svobody 471/4, 160 01 Praha 6

Vydal: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti
oos.army.cz

NEPRODEJNÉ
