

Využití terahertzového vlnění v bezpečnostní komunitě

Utilization of terahertz waves in the security community

Jiří Tobolík

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří TOBOLÍK**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Využití terahertzového vlnění v bezpečnostní komunitě.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma terahertzového vlnění.
2. Popište historický význam terahertzového vlnění, kdy bylo vlnění objeveno a začalo se prakticky využívat.
3. Proveďte teoretický rozbor terahertzového vlnění a jeho vliv na člověka.
4. Popište v současnosti obecné způsoby využití technologií pracujících na terahertzovém vlnění.
5. Navrhněte využitelnost terahertzového vlnění v konkrétních bezpečnostních technologiích za podpory platné legislativy.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. MAŤÁTKO, Jan. Elektronika-lasery : Kvantové generátory světla. Praha : IDEA SERVIS, 1998. 57 s. ISBN 80-85970-21-X.
2. SIZOV, F. THz radiation sensors. Opto-electronics review. 2010, no. 1, s. 10-36.
3. ANTONOV, A.V., et al. Emission spectra of terahertz quantum cascade laser. Radiophysics and Quantum Electronics. 2009, no. 7, s. 494-499.
4. COOPER, K.B., et al. An Approach for Sub-Second Imaging of Concealed Objects Using Terahertz (THz) Radar. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2009, no. 30, s. 1297-1307.
5. ZEITLER, Axel, et al. Drug hydrate systems and dehydration processes studied by terahertz pulsed spectroscopy. International Journal of Pharmaceutics. 2007, no. 334, s. 78-84.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Juříčka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

19. února 2010

Termín odevzdání bakalářské práce:

19. května 2010

Ve Zlíně dne 19. února 2010

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Terahertzové (THz) vlnění a jeho komerční využití má v současné době ambici stát se jedním ze stěžejních prostředků pro zjišťování a detekování skrytých objektů, zejména pak využití vlnění v bezpečnostních technologiích jako detektor různých objektů, které jsou hodnoceny jako bezpečnostní hrozba. Využitím THz vlnění se tak může dostat lidstvu do rukou nástroj, který je schopen značně eliminovat rostoucí vliv různých skupin terorismu. Konečné aplikace THz vlnění jsou v současnosti v pokročilém stupni vývoje, avšak jeho „okamžitá“ aplikace je nemožná z mnoha důvodů, ať už finanční náročnosti nebo dodatečného výzkumu. Přesto by v budoucnu měly technologie založené na tomto vlnění posílit bezpečnost prostřednictvím skenerů na letištích, soudních budovách, nápravných zařízeních nebo jiných místech a budovách, ve kterých je kladen důraz na ochranu lidí, pracovních skupin a života.

Klíčová slova: terahertzové záření, zobrazování, bezpečnostní skenování, tělesný skener

ABSTRACT

Terahertz (THz) waves and its commercial utilization have ambition to become one of the key resources for identifying and detecting hidden objects, especially usage of waves in security technologies such as detection of various objects, which are evaluated as a security threat. Using THz waves, humanity can get an instrument capable of substantially eliminating the growing influence of the various groups of terrorism. Final applications of THz waves are currently at an advanced stage of development, but its “instantaneous” application is impossible for many reasons, whether it’s financial or additional research. Still, in the future technologies based on this kind of waves enhance security through body scanners at airports, court buildings, reformatory prisons or others important buildings where is emphasis to protect people.

Keywords: terahertz radiation, imaging, security screening, body scanner

Poděkování, motto

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Martinu Juříčkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a jeho vstřícný přístup během konzultací. Dále děkuji svým rodičům, kteří mi umožnili studovat, a kteří jsou mi vždy velkou oporou. Velké poděkování patří i mé přítelkyni, která se mnou měla při psaní mé práce trpělivost a vždy mi vyšla vstříc.

„Per aspera ad astra!“

„Budoucnost patří těm, kdo věří svým snům.“

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 VLNĚNÍ OBECNĚ.....	11
1.1 TERAHERTZOVÁ MEZERA	11
1.2 HISTORIE TERAHERTZOVÝCH TECHNOLOGIÍ	12
1.3 ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM	13
1.3.1 Rádiové vlny	14
1.3.2 Mikrovlny.....	15
1.3.3 Infračervené záření.....	16
1.3.4 Viditelné světlo	17
1.3.5 Ultrafialové záření (UV – ultraviolet).....	17
1.3.6 Rentgenové záření	18
1.3.7 Gama záření	18
2 VLASTNOSTI TERAHERTZOVÉHO VLNĚNÍ.....	19
2.1 PRONIKAVOST ATMOSFÉROU	19
2.2 PRONIKAVOST MATERIÁLY	20
2.3 NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	21
2.4 JINÉ MOŽNÉ ZDRAVOTNÍ ÚČINKY.....	22
2.5 ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST	24
3 VYUŽITÍ TERAHERTZOVÉHO VLNĚNÍ	25
3.1 LÉKAŘSKÉ ZOBRAZOVÁNÍ	25
3.2 BEZPEČNOSTNÍ SKENOVÁNÍ (ZOBRAZOVÁNÍ)	26
3.3 VĚDECKÉ VYUŽITÍ A ZOBRAZOVÁNÍ	26
3.4 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ	26
3.5 KONTROLA RAKETOPLÁNŮ.....	26
4 ZDROJE THZ VLNĚNÍ.....	27
4.1 PŘIROZENÉ THZ ZDROJE	27
4.2 UMĚLÉ THZ ZDROJE.....	27
4.2.1 Širokopásmové zdroje	28
4.2.1.1 Fotovodivostní emitory (Photoconductive emitters)	28
4.2.1.2 Optické usměrňování (Optical rectification)	29
4.2.1.3 Povrchové emitory (Surface emitters)	30
4.2.2 Úzkopásmové zdroje	31
4.2.2.1 Kvantový kaskádový laser (Quantum Cascade Laser – QCL)	32
4.2.2.2 Laser na bázi volných elektronů (Free - electron laser – FEL)	34
4.2.2.3 Elektronické zdroje	34
5 DETEKCE THZ VLNĚNÍ	35
5.1 JEDNOPIXELOVÁ KAMERA	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
6 BEZPEČNOSTNÍ APLIKACE TERAHERTZOVÉHO ZÁŘENÍ	38

6.1	TERAHERTZOVÁ SPEKTROSKOPIE V ČASOVÉ OBLASTI	38
6.2	TERAHERTZOVÉ ZOBRAZOVÁNÍ.....	40
6.3	PASIVNÍ ZOBRAZOVÁNÍ	41
6.4	BEZPEČNOSTNÍ SKENOVÁNÍ OSOB	42
6.4.1	Postupy zabráňující narušení soukromí	43
6.4.2	Jaké jsou možnosti cestujících?	44
6.4.3	Platná legislativa v ČR.....	44
6.5	V SOUČASNOSTI POUŽÍVANÉ TYPY TĚLESNÝCH SKENERŮ.....	46
6.5.1	Millimeter wave technology (MMW).....	46
6.5.2	Backscatter	48
6.5.3	Legislativní aspekty u rentgenových zařízení	50
6.5.4	Stanovisko SÚJB k používání bezpečnostních rentgenů	51
7	THZ ZOBRAZOVACÍ SYSTÉMY	52
7.1	1,56THZ ZOBRAZOVACÍ SYSTÉM.....	52
7.2	660 – 690GHZ ZOBRAZOVACÍ RADAR	57
7.3	BUDOUCNOST THZ ZOBRAZOVÁNÍ	60
	ZÁVĚR	61
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
	SEZNAM TABULEK.....	70

ÚVOD

Terahertzové vlnění je v současnosti jednou z posledních využívaných technologií týkající se výzkumu zobrazování. Zobrazování jako takové je jednou ze základních podmínek pro detekci nebo zjišťování předmětů ať už skrytých nebo volně viditelných. Mezi největší přednosti tohoto vlnění patří jeho schopnost prostupovat různými nevodivými materiály (papír, lepenka, šaty či plasty) a zároveň nepropustnost kovy a vodou. Jestliže se tyto transmisní a reflexní vlastnosti THz vlnění spojí s dostatečně krátkou vlnovou délkou, pomocí které lze vytvářet snímky s dostatečnou rozlišovací schopností, dostává se lidstvu do rukou technologie, která je schopná detekovat kovové i nekovové předměty ukryté pod oděvem. Spousta látek, které jsou z pohledu bezpečnosti velmi důležité (výbušniny, drogy, léky), má navíc v THz regionu svůj specifický „otisk prstu“, čehož lze využít nejen k detekci, ale i okamžité identifikaci dané látky. Technologie zobrazování pomocí THz vlnění najde v budoucnu uplatnění hlavně na kontrolních stanovištích na letištích, soudech, nápravných zařízeních či jiných důležitých budovách. Výhodou tohoto způsobu skenování osob je jistě větší komfort kontrolovaných osob, které tak nemusí podstupovat fyzické prohlídky. Naproti tomu se ozývají ochránci práv, kteří upozorňují na porušení soukromí, protože touto technologií lze vytvořit snímky „nahé“ osoby. Konkrétně na letištích pak může tato technologie okamžité identifikace látek v budoucnu vyřešit problém se zákazem vnášení jakýchkoliv tekutin či gelů na palubu letadla. Protipólem výhod je pak stále probíhající výzkum vlivu tohoto vlnění na lidský organismus. V zásadě se jedná o neionizující záření, které má velmi malou energii, a tudíž neohrožuje zdraví lidí. Během výzkumy byly ale zjištěny skutečnosti, podle kterých může být THz vlnění za určitých specifických podmínek pro člověka škodlivé. Jelikož by finální aplikace nebo produkty na bázi THz vlnění byly využity v běžném životě, kde by s nimi přišla do styku široká veřejnost, je nutnou podmínkou toto vlnění do detailu prozkoumat ve vztahu k lidskému faktoru. Tento výzkum bude stěžejní v dalším možném využití jednak v bezpečnostních technologiích ale také např. ve vývoji výzkumu, lékařství, komunikacích nebo elektronice. Vedle výzkumu účinků THz vlnění na lidské zdraví ale i nadále probíhají rozsáhlé vědecké projekty za účelem zdokonalení technologie samotné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

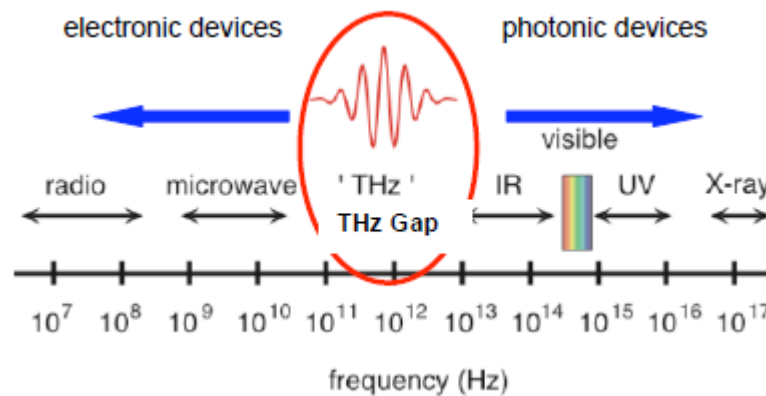
1 VLNĚNÍ OBECNĚ

Jestliže ve fyzice hovoříme o terahertzovém záření, máme tím na mysli elektromagnetické vlny vysílané na frekvencích terahertzového pásma. Tato oblast elektromagnetických vln je známa pod mnoha označeními. Používají se označení jako terahertzové záření (THz radiation), terahertzové vlny (THz waves), T-paprsky (T-rays), T-lux, THz či submilimetrové záření (submillimeter radiation). Tato všechna označení se nejčastěji používají pro oblast elektromagnetického spektra mezi 300 GHz (3×10^{11} Hz) a 3 THz (3×10^{12} Hz), což odpovídá vlnové délce od 1 mm do 100 μm .

Pokud se ale bavíme o jednotlivých oblastech elektromagnetického spektra, je známo, že hranice těchto oblastí nejsou přesně vymezeny a často se prolínají. Dá se tedy říci, že v různých literárních zdrojích nalezneme pro každou oblast různé hraniční frekvence.

1.1 Terahertzová mezera

Dříve bylo rádiovou či mikrovlnnou technikou velmi obtížné generovat frekvence v řádech desítek gigahertz a více, a protože chyběly použitelné zdroje i z druhé strany, tzv. optické části elektromagnetického spektra, byla terahertzová (THz) oblast dlouho poslední nevyužívanou oblastí celého spektra. Z tohoto důvodu se pro tuto oblast spektra vžil pojem terahertzová mezera (terahertz gap). Tato oblast tedy sousedí z jedné strany s mikrovlnami a z druhé se vzdáleným infračerveným zářením (far-infrared), a protože dříve THz záření nepatřilo mezi „základní“ oblasti elektromagnetického spektra, zasahuje nyní do obou těchto pásem. V mnoha vědeckých zdrojích byla nalezena definice THz oblasti uvádějící, že spodní hranicí THz oblasti je kmitočet 100 GHz, což odpovídá vlnové délce 3 mm. Jestliže vezmeme v úvahu rozdělení kmitočtového pásma rádiových vln dle IEEE (viz. tabulka 1), můžeme do THz mezery zahrnout celé pásmo EHF. Pro toto rozšíření o pásmo tzv. milimetrových vln hovoří i velice podobné vlastnosti těchto vln (viz. dále). Ve své práci tedy terahertzovou oblastí míním elektromagnetické vlny v rozsahu 30 GHz (3×10^{10} Hz, vlnová délka 1 cm) až 10 THz (vlnová délka 30 μm), z čehož pásmo od 30 GHz až 3 THz zasahuje do původní mikrovlnné oblasti, kdežto kmitočty 3 THz až 10 THz do oblasti infračervené.



Obrázek 1: THz mezera v elektromagnetickém spektru [1]

1.2 Historie terahertzových technologií

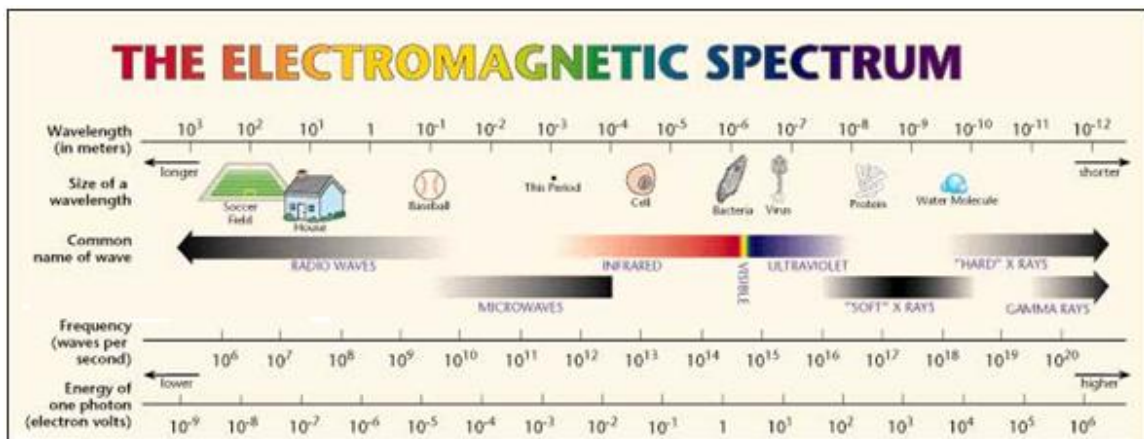
O velmi výhodných vlastnostech záření o terahertzových vlnových délkách, které z něj dělají velmi vhodný prostředek pro zobrazování a mnoho dalších aplikací, se ví již dlouhá léta. Zatímco ale první rentgenový snímek byl zhotoven již v prosinci roku 1895, na první THz snímky si svět musel počkat dalších 100 let. Důvodem byla absence vhodných zdrojů. Terahertzový frekvenční rozsah totiž leží v elektromagnetickém spektru na rozhraní elektronické a optické části a ani jedním typem zdrojů nebylo možné tyto frekvence generovat. Elektronické zdroje nebyly schopné produkovat vlny tak dlouhé, a naopak optické zdroje nedokázaly vysílat vlny tak krátké.

První oblastí, kde se THz záření začalo uplatňovat, byla spektroskopie, čemuž dopomohl objev praktického kompaktního femtosekundového pulzního laseru ke konci 80. let. Díky vývoji v kvantové fyzice bylo v roce 1994 dalším významným krokem předvedení nového tzv. kvantového kaskádového laseru, což je polovodičový laser založený na heterostruktuře kvantových jímek. Tento typ laseru byl zkonstruován v Bell Laboratories a jeho vývoj pokračoval hledáním nových materiálů, které by umožňovaly generovat stále nižší frekvence. Roku 1998 byl tedy představen kvantový kaskádový laser na bázi materiálu GaAs/AlGaAs, který se pro frekvence blížící se 1 THz stále používá.

Počátkem nového tisíciletí se díky pokroku v mnoha vědních oborech (např. nanotechnologie, metamateriály, kvantová fyzika atd.) začalo věnovat oblasti terahertzového záření mnoho výzkumných týmů po celém světě. V letech 2001 – 2004 také probíhal projekt zvaný „THz Bridge“, který studoval THz záření z pohledu případného ovlivňování biologických systémů.

1.3 Elektromagnetické spektrum

Znamé dřívější základní dělení elektromagnetického spektra je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 2: Elektromagnetické spektrum [2]

Rozdělení kmitočtového pásma rádiových vln definuje následující tabulka, kterou doporučuje IEEE, plným názvem Institute of Electrical and Electronics Engineers (česky „Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství“). Část THz pásma je v této tabulce vyznačena tmavším podkladem políček.

Tabulka 1: Označení kmitočtových pásem dle IEEE [3]

Pásmo	Označení frekvenčního pásma	Česky	Frekvence	Vlnová délka
2	ELF (Extreme Low F.)	EDV (extr. dlouhé v.)	30 – 300 Hz	10 – 1 Mm
3	VF (Voice Frequency)		300 – 3000 Hz	1 – 0,1 Mm
4	VLF (Very Low F.)	VDV (velmi dlouhé v.)	3 – 30 kHz	100 – 10 km
5	LF (Low Frequency)	DV (dlouhé vlny)	30 – 300 kHz	10 – 1 km
6	MF (Medium Frequency)	SV (střední vlny)	300 – 3000 kHz	1 – 0,1 km
7	HF (High Frequency)	KV (krátké vlny)	3 – 30 MHz	100 – 10 m
8	VHF (Very High F.)	VKV (velmi krátké v.)	30 – 300 MHz	10 – 1 m
9	UHF (Ultra High F.)	UKV (ultra krátké v.)	300 – 3000 MHz	100 – 10 cm
10	SHF (Super High F.)	SKV (super krátké v.)	3 – 30 GHz	10 – 1 cm
11	EHF (Extreme High F.)	EKV (extr. krátké v.)	30 – 300 GHz	1 – 0,1 cm
12	Submillimeter	Submilimetrové vlny	300 – 3000 GHz	1 – 0,1 mm

Elektromagnetické spektrum zahrnuje elektromagnetické záření všech možných vlnových délek. Elektromagnetické záření o vlnové délce λ má frekvenci f a jemu připisovaný foton má energii E .

Vztah pro přepočítání frekvence na vlnovou délku a obráceně má následující podobu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m; \frac{m}{s}, Hz] \quad (1)$$

kde: c je rychlost šíření vlnění v prostředí, λ vlnová délka (délka vlny) a f frekvence.

Fotony takového záření mají energii.

$$E = h \cdot f \quad [J; J \cdot s, s^{-1}] \quad (2)$$

Dosazením rovnice (1) do rovnice (2) získáme následující vztah:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3)$$

Kde: $h = 6,62606896 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ je Planckova konstanta,

$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla ve vakuu

Pokud vyjádříme součin $h \cdot c$ v jednotkách $eV \cdot nm$ ($1eV = 1,602176487 \cdot 10^{-19} J$), dostaneme užitečné vyjádření energie fotonu v elektronvoltech.

$$E \doteq \frac{1240 \cdot nm}{\lambda} \cdot eV \quad (4)$$

1.3.1 Rádiové vlny

Nejvíce vlevo (největší vlnová délka, nejmenší kmitočet) se v elektromagnetickém spektru nacházejí tzv. rádiové vlny. Tento termín lze chápat dvojím způsobem. Z širšího pohledu jsou to všechny kmitočty uvedené v tabulce 1. Jiným pohledem můžeme jako rádiové vlny považovat pouze část těchto kmitočtů, konkrétně se jedná o frekvence do 300 MHz. Frekvence nad 300 MHz totiž již zahrnujeme do mikrovlnné oblasti. Zdrojem rádiových vln je anténa vysílače, která mění elektrickou energii na energii elektromagnetických vln. V tabulce 1 je uvedeno podrobnější dělení rádiových vln, kdy každé z těchto pásem má také své specifické použití.

ELF, VF, VLF – tyto nejnižší kmitočtová pásma mají své využití hlavně v oblasti komunikace s ponorkami a komunikace v dolech. Dále je tyto frekvence možné využít pro meteorologické služby.

LF – použití pro rozhlasové dlouhé vlny (dnes se již téměř nepoužívá), radiokomunikaci a meteorologické služby.

- výhoda – dobře se šíří (vlnová délka umožňuje ohýbat se podél kopců)
- nevýhoda – malá frekvence => přenesení málo dat => špatná kvalita

MF – střední vlny se používají především pro přenos rozhlasového vysílání v atmosféře. Tyto vlny se mohou šířit částečně odrazem od ionosféry a vzhledem ke své poměrně velké vlnové délce se dobře ohýbají za přírodními překážkami, zejména terénními vyvýšeninami. Používají se pro vysílání nejčastěji do okruhu stovek kilometrů, nejvýše několika tisíc kilometrů. Pro přenos zvukového signálu se používá amplitudová modulace (AM).

HF – tyto vlny se používají především pro přenos rozhlasového a radiového signálu v atmosféře a také využívají amplitudovou modulaci. Stejně jako u MF není u těchto vln nutná přímá dohlednost mezi vysílačem a přijímačem, protože se vlny šíří díky mnohonásobným odrazům od ionosféry. Prostřednictvím těchto krátkých vln se často vysílají zahraniční programy rozhlasových stanic do zemí, kde je omezena svoboda projevu.

VHF – jedná se o frekvenčně modulované rozhlasové vysílání (FM), které je dnes fakticky jediným běžně používaným pásmem. Dále je toto pásmo využito pro 1. – 3. televizní pásmo. Tyto vlny se v krajině šíří již téměř přímočaře, což znamená nutnost zajištění alespoň přibližné viditelnosti vysílače v místě, kde chceme signál přijímat. Signál tak můžeme ztratit pouhým sjezdem do údolí.

1.3.2 Mikrovlny

Za mikrovlny je často považováno (hlavně dříve) elektromagnetické vlnění s frekvencí v intervalu 300 MHz až 300 GHz, což odpovídá délce vlny v rozsahu od 1m do 1 mm. Jak bylo ale napsáno, frekvence vyšší než 30 GHz (resp. 100 GHz) se zahrnují do tzv. „terahertzové mezery“, protože dříve chyběl jejich funkční zdroj.

Takto upravené mikrovlnné pásmo se dále dělí na dvě části:

UHF – pásmo těchto vln je využíváno 4. a 5. televizním pásmem a také pro digitální televize. Oblast UHF je také využívána mobilními telefony, přesněji tedy sítí GSM (0,9 GHz, 1,8 GHz a 1,9 GHz). Dalším významným způsobem využití jsou Wi-Fi sítě (standardy IEEE 802.11a/b/n využívají pásmo 2,4 GHz). Z předchozích vět plyne, že pásmo UHF je poměrně hodně zahlceno.

SHF – nejnovější specifikace Wi-Fi sítí IEEE 802.11/n může využívat také pásmo 5 GHz spadající do této oblasti. Frekvenční pásmo se dále používá u radarů či pro různé druhy komunikace (např. satelity). Nejznámějším způsobem je ale využití mikrovlnou troubou (2,45 GHz, 12,24 cm).

A proč mají vlastně mikrovlny schopnost ohřívat?

Energie tohoto vlnění je přibližně 0,00001 eV, což je energie velmi malá a nestačí ani k rozbití nejslabší chemické vazby, z čehož plyne, že odtud schopnost mikrovln ohřívat neplyne. Pro ohřev se využívá jevu, při kterém se molekuly látek se stálými dipólovými momenty mají tendenci natáčet do směru elektrického pole tak, aby dosáhly stavu s minimální energií. Snaha vyrovnat se s měnícím se elektrickým polem mikrovln vede k rotačnímu pohybu, při němž dochází ke kolizím a tření se sousedními molekulami a ke vzniku tepla. Nejběžnější molekulou, jejíž permanentní dipólový moment vede k její rotaci při ozařování mikrovlnami, je voda, která je zároveň ve značném množství přítomna v biologických materiálech a způsobuje tak jejich ohřev v mikrovlnné troubě. [4]

1.3.3 Infračervené záření

Infračervené záření (IR – infrared) se vyznačuje vlnovou délkou 1 mm (prolíná se s THz oblastí) až 760 nm (sousedí s oblastí viditelného světla). Často se infračervené záření nazývá tepelným zářením, a přestože lidé IR nevidí, mohou blízké IR cítit jako teplo svými receptory v pokožce. Přírodním zdrojem infračerveného záření je sluneční záření, jehož je součástí. Energie fotonů tohoto záření se pohybuje v rozmezí 0,0012 až 1,63 eV.

Tento druh záření je také velice často používán, a to v široké škále aplikací. Zmíním zde hlavně využití pro komunikaci, kdy se infračervené záření používá pro přenos informace na krátkou vzdálenost, nejčastěji dle standardu IrDA (použití v mobilních telefonech či dálkových ovladačích). Zdrojem záření je v těchto aplikacích LED dioda. Dále se infračervené záření využívá pro telekomunikační účely v optických vláknech, ve kterých

využíváme viditelné světlo nebo k němu přiléhající oblast blízkého infračerveného záření. Časté je také využití infračervené spektroskopie, která studuje složení organických sloučenin na základě měření pronikání infračerveného záření vzorkem, přičemž využíváme toho, že různé molekulární vazby pohlcují různé vlnové délky (vlastnost stejná s THz zářením).

Pro průmysl komerční bezpečnosti je důležitá informace, že objekty při pokojové teplotě emitují nejvíce záření právě v infračerveném pásmu 8 – 12 μm , což využíváme u prostorové ochrany pomocí PIR detektorů. Tuto část spektra dále v PKB využíváme u hlásičů plamene, jež detekují projevy hoření v infračerveném spektru.

1.3.4 Viditelné světlo

Asi obecně nejznámější oblastí elektromagnetického spektra je viditelné světlo o vlnové délce 750 nm (červená barva) až 400 nm (fialová barva). V oblasti viditelného světla je maximum elektromagnetického záření ze Slunce dopadajícího na zemský povrch a tento druh elektromagnetického záření je jediným, který přímo vnímáme zrakem

1.3.5 Ultrafialové záření (UV – ultraviolet)

UV záření se dělí na blízké s vlnovou délkou 400 – 200 nm a daleké s vlnovou délkou 200 – 10 nm, čemuž odpovídá energie fotonů 3,1 a 250 eV. Z hlediska biologických účinků UV záření jej můžeme rozdělit na typy UVA, UVB a UVC.

UVA je oblast od 400 nm do 315 nm. Téměř 99 % UV záření dopadajícího na zemský povrch je z této spektrální oblasti a pro živé organismy je nezhoubné. Oblast UVB s vlnovou délkou 315 až 280 nm je z převážné většiny absorbováno ozónem ve stratosféře, resp. ozónové vrstvě. Jestliže se ale zvýší intenzita UVB záření, zvyšuje se možnost výskytu rakoviny kůže.

UV záření využíváme v řadě aplikací, uvést můžeme např. svítidla na kontrolu např. cenných papírů, výbojkové obloukové lampy, spektroskopie, biochemie, vymazávání paměťových modulů EPROM a mnoho dalších. V průmyslu komerční bezpečnosti využíváme UV záření např. v hlásičích plamene, které detekují projevy hoření v UV spektru. Tyto hlásiče jsou lepší, ale také dražší než hlásiče v infračerveném spektru, jsou méně náchylné na falešné popluchy, ale mají kratší životnost.

1.3.6 Rentgenové záření

Rentgenové záření (RTG, X-ray) se vyznačuje vlnovými délkami v rozmezí 10 nm až 10 pm. Jedná se o ionizující záření, a tudíž může být nebezpečné. Fotony rentgenového záření vznikají při interakcích vysoce energického elektronu a mají velkou energii, a tudíž značnou pronikavost. Energie fotonů je při vlnové délce 10 nm rovna přibližně hodnotě 0,12 keV a u vlnové délky 10 pm dokonce 124 keV. Zemská atmosféra sluneční rentgenové záření nepropouští. Hlavní využití je při lékařských vyšetřeních a také při bezpečnostním skenování zavazadel na letištích, úřadech a v jiných důležitých budovách.

1.3.7 Gama záření

Poslední skupinou s nejkratší vlnovou délkou (tedy nejvyšší frekvencí) je gama záření. Je to radioaktivní záření, které vzniká při jaderných reakcích v jádrech izotopů některých prvků. Vyznačuje se velkou pronikavostí a ionizačními účinky. Hranice mezi rentgenovým zářením a gama zářením není přesně dána a tyto typy se mohou prolínat. Zda se jedná o rentgenové či gama záření rozhoduje použitý zdroj. Obecně se jako hranice mezi těmito oblastmi udávají vlnové délky desítek pikometrů.

Způsobuje podobná poškození jako rentgenové záření (popáleniny, rakovinu a genové mutace). Gama záření je účinným prostředkem pro hubení bakterií, takže je využíváno při sterilizaci lékařských nástrojů či ošetřování potravin. V lékařství se používá pro léčbu rakoviny, i když ji samo může způsobovat.

2 VLASTNOSTI TERAHERTZOVÉHO VLNĚNÍ

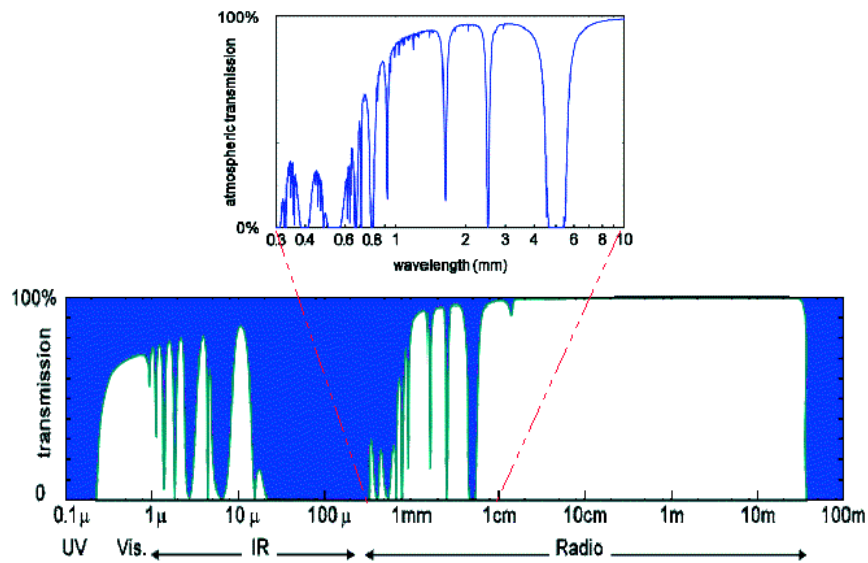
Terahertzová oblast byla dlouhou dobu poslední neprozkoumanou oblastí elektromagnetického spektra. V posledních letech ale zájem o tuto část spektra rapidně stoupá. Je to dáno zajímavými vlastnostmi, které milimetrové a submilimetrové vlny vykazují. Proč se tedy vlna zájmu zvedla až nyní? Důvodem je skutečnost, že dříve chyběly vhodné zdroje tohoto záření, a proto nemohlo být využíváno.

2.1 Pronikavost atmosférou

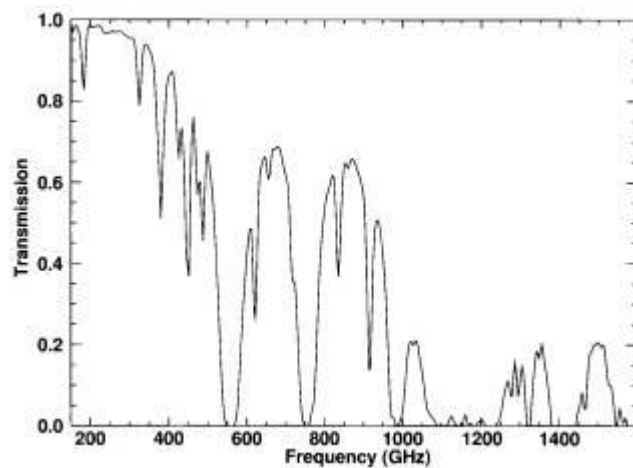
THz vlnění se v atmosféře šíří přímočaře a je silně pohlcováno Zemskou atmosférou. Při používání THz záření je tedy nutné brát v úvahu jeho propustnost v atmosféře, protože, jak již bylo řečeno, THz vlny jsou silně pohlcovány molekulami vody vyskytujícími se v atmosféře.

Naštěstí existuje několik propustných pásem, které je možno využívat. Typický útlum THz světla v těchto propustných pásmech je 50 dB/km (platí pro 0,8 THz). Pro minimalizaci absorpčních ztrát je tedy důležité zvolit vhodnou frekvenci lokalizovanou právě v jednom z těchto propustných pásem. Jako propustné pásmo můžeme označit frekvence okolo 0,5, 0,65, 0,87, 1,02, 1,29, 1,36 a 1,52 THz. [5]

Na tomto místě bych chtěl ale upozornit na to, že se během psaní bakalářské práce získalo několik grafů znázorňujících propustnost či útlum THz záření v atmosféře a ne všechny se přímo shodovaly. Může to být dáno tím, že na různých místech Země je propustnost různá, a že propustnost atmosféry není stálá a kolísá podle množství vodních par, kondenzace vlhkosti, plyných příměsí, nečistot i směru šíření. Hodnota propustnosti (či útlumu) se mění také s nadmořskou výškou a platí, že THz záření se ve vysokých nadmořských výškách (nad 10 km) šíří mnohem lépe než u povrchu Země.



Obrázek 3: Absorpce atmosféry [6]



Obrázek 4: Absorpce atmosféry v rozsahu od 150 GHz do 1,6 THz [7]

2.2 Pronikavost materiály

Druhou důležitou vlastností je schopnost pronikat nevodivými materiály, jako je oblečení, papír, lepenka, dřevo, zdivo, keramika a plasty. Kovy a vodou ale THz záření proniknout nedokáže. U vody je to dáno tím, že se jedná o polární látku. Polární látky se vyznačují tím, že jejich molekuly jsou nesymetrické, a proto na jejich koncích vzniká elektrický náboj. Právě tato elektrická vodivost způsobuje velkou absorpci vody.

2.3 Neionizující záření

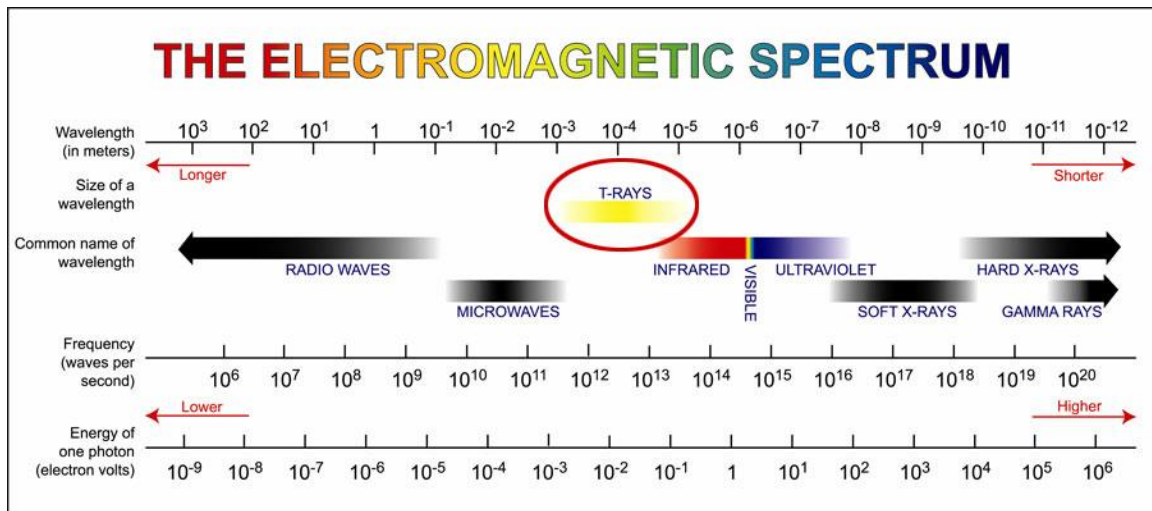
Pro spoustu aplikací je velmi důležitou vlastností to, že THz záření je, stejně jako mikrovlnné záření, neionizující.

Ionizace představuje převedení volného atomu nebo molekuly na iont (kladný nebo záporný) odtržením jednoho či více elektronů (popřípadě připojením tohoto elektronu či elektronů k neutrálnímu atomu). Nastává v látkách při zvýšené teplotě nebo nárazem urychlených částic či fotonů. Dodá-li se atomu dostatečně velká energie, může se elektron zcela odpoutat od atomu – atom se ionizuje. Energie k tomu potřebná se nazývá ionizační energií. Zcela obdobně se excitují a ionizují i molekuly. Dodávat atomu potřebnou energii pro ionizaci, je možno několika způsoby, ale v naší problematice nás zajímá pouze ionizace pomocí elektromagnetického záření. V tomto případě atom přebírá potřebnou ionizační energii od fotonu, který vnikl do atomu. Sem patří ionizace ultrafialovým, rentgenovým a gama zářením. Ionizační potenciál je energie, kterou je třeba vynaložit na „utržení“ jednoho elektronu z volného atomu, nacházejícího se v základním stavu. Udává se v eV ($1 eV = 1,602176487 \times 10^{-19} J$). [8]

Pro vodík má tento ionizační potenciál hodnotu 13,53 eV, kyslík 15,8 eV. Když tyto hodnoty porovnáme s následující tabulkou, zjistíme, že energie fotonů terahertzového frekvenčního pásma je natolik malá, že není schopna ionizovat lidskou tkáň.

Tabulka 2: Energie fotonů THz frekvenčního pásma

Vlnová délka [mm]	Frekvence [THz]	Energie fotonů [eV]
10	0,03	0,000124
1	0,3	0,00124
0,1	3	0,0124
0,03	10	0,0413



Obrázek 5: Energie fotonu [9]

Ionizace je tedy počáteční fyzikální proces, který prostřednictvím navazujících fyzikálních, chemických a biologických dějů může vést k negativním zdravotním důsledkům. V zásadě mohou nastat následující situace:

- Buňka může být buď okamžitě usmrcena, nebo může být poškozena tak, že se již není schopna dělit
- Poškození buňky nenarušuje její schopnost se dělit, ale projevuje se poruchou genetické informace uložené v chromozómech. Záření vyvolává změny (mutace), které lze rozdělit na:
 - somatické – postihují somatické buňky; nepřenášejí se na další generace; jsou typické pro získaná nádorová onemocnění
 - gametické – postihují germinální buňky; přenáší se na další generace; příčina geneticky podmíněných (nejen) nádorových onemocnění

To, že je THz záření neionizující tedy znamená, že je pro člověka neškodné, což je pro aplikace popsané níže velmi užitečné.

2.4 Jiné možné zdravotní účinky

Jak již bylo zmíněno, THz záření je neionizující, což znamená, že nemá dostatečnou energii k odtržení elektronů z atomů či molekul, a tudíž nemůže vyvolat další děje (fyzikální, chemické či biologické), které mohou způsobovat nežádoucí zdravotní problémy. Tento závěr je uveden téměř ve všech zdrojích jako konečný.

U nových technologií ale nikdy nemůžeme říct, že o nich víme vše. Tým výzkumníků v čele s B. S. Alexandrovem z Theoretical Division and Center for Nonlinear Studies z Los Alamos National Laboratory (LANL) v Novém Mexiku zkoumal vliv THz pole na dvojitou šroubovici DNA (dsDNA) a dospěl k velmi zajímavým výsledkům.

Na základě výsledků testování je v článku uvedeno, že specifické THz ozáření může významně ovlivnit přírodní dynamiku DNA a tím ovlivnit složité molekulové procesy spojené s expresí genu a DNA replikací (reprodukce stejným způsobem).

Možnost ovlivňování genetického materiálu, enzymatických reakcí atd. nízkými kmitočty elektromagnetického záření byla představena již dávno a je předmětem neustálé diskuze. Energie takového záření je příliš nízká než aby přímo narušila chemické vazby. K patrným biologickým účinkům mohou vést pouze rezonanční efekty. V biomolekulách je taková interakce možná kvůli všudypřítomným vodíkovým vazbám, které mají energii v THz rozsahu.

Mezinárodní výzkumný projekt „THz Bridge“ (probíhal v letech 2001-2004), který se výslovně zabýval THz radiační genotoxicitou, došel k následujícímu závěru: „při některých specifických podmínkách expozice byly objeveny změny v membránové propustnosti lipozomů (mikroskopické částice dopravující výživné látky hluboko do podkoží) a byla pozorována indukce genotoxicity v bílých krvinkách.“ [10] Tento projekt tak potvrdil, že THz záření je genotoxické pro genetický materiál, ale zůstává nejasné, za jakých specifických podmínek se takové efekty vyskytují.

Novodobé měření potvrdily, že pouze delší vystavení (6 hodin) slabému THz poli může způsobit genomovou nestabilitu v lidských bílých krvinkách. Nezávisle na tom bylo ohlášeno, že neurony (nervové buňky) vystavené silnému THz záření (přes 30 mW/cm^2) způsobí porušení morfologie (tvaru) buněčných (celulárních) membrán a vnitrobuněčných struktur. Stejná práce také ukázala, že s klesajícím výkonem a/nebo jinými frekvencemi se morfologické změny nevyskytují. Bylo také ukázáno, že vystavení laboratorních myší vysokovýkonnému (15 mW/cm^2) 3,6 THz záření po dobu 30 minut způsobilo změny v jejich chování, zatímco při krátkých dobách expozice (5 min) tyto změny nebyly odhaleny. Tato dostupná experimentální data tak naznačují, že THz záření může ovlivnit biologickou funkci, ale jen za specifických podmínek: vysoký výkon, nebo/a dlouhá doba expozice, nebo/a specifická THz frekvence.

Výzkum LANL poukázal na to, že THz pole může způsobit dynamické rozdělení dvojité šroubovice DNA. Nicméně tyto bublinky se ve dvojité šroubovici DNA mohou objevit pouze v případě výskytu nelineárních mechanismů vyžadujících prostorový vzruch přes jistou prahovou hodnotu, jenž je určena intenzitou a frekvencí THz pole. Hlavním efektem THz záření je tedy rezonanční účinek ovlivňující dynamickou stabilitu dsDNA systému. V biologických systémech jsou taková kolísání (fluktuace) generována tepelně. Z toho důvodu je výskyt kolísání s velkým rozkmitem velmi vzácný a vyskytuje se pouze při dlouhé době vystavení se THz poli, zvláště je-li výkon malý. [11]

Při potenciálních aplikacích (viz. další kapitola) určitě nehrozí doba expozice v řádu desítek minut a vyloučením specifických podmínek, za kterých může docházet k nežádoucím biologickým účinkům, můžeme, dle mého názoru, označit THz záření jako zdraví neškodné.

2.5 Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopností rozumíme vzdálenost dvou bodů, které je možno zobrazit jako dva samostatné body. Obecně platí, že není možné rozlišit body bližší než polovina vlnové délky záření.

Jestliže si uvědomíme, jakou vlnovou délku mají různé frekvence v THz regionu, zjistíme, že tato vlnová délka je naprosto dostatečná pro celou škálu potenciálních aplikací, o kterých budu psát v dalších kapitolách. V bezpečnostních aplikacích nepotřebujeme vytvářet snímky, jejichž rozlišovací schopnost a velikost jednoho pixelu bude srovnatelná se snímky pořizovanými např. digitální zrcadlovkou. V bezpečnostních aplikacích postačí generování poměrně hrubých snímků, ze kterých ale poznáme skryté hrozby. Submilimetrové frekvence jsou pro tyto aplikace naprosto dostačující.

3 VYUŽITÍ TERAHERTZOVÉHO VLNĚNÍ

Sklobením vlastností uvedených v minulé kapitole (pronikavost různými materiály, nepronikavost kovy a vodou, neionizující záření a slušná rozlišovací schopnost) získáváme velmi zajímavý rozsah frekvencí, které je možno využít v široké škále aplikací:

- Lékařské zobrazování
- Bezpečnostní skenování (zobrazování)
- Vědecké využití a zobrazování
- Průmyslové využití
- Kontrola raketoplánů

3.1 Lékařské zobrazování

Na rozdíl od mnohem energetičtějších rentgenových paprsků, nemají THz paprsky dostatečnou energii k ionizaci atomu uvolněním jednoho či více jeho elektronů. Tato ionizace způsobuje buněčné poškození, které může vést k nemoci z ozáření či rakovině. Jelikož jsou THz paprsky neionizující záření, nebudou lidé vystavení tomuto záření trpět žádnými škodlivými následky. To znamená, že by v budoucnu mohlo být škodlivé rentgenové záření nahrazeno neškodným THz zářením. Zde je ale nutno opět zmínit, že THz paprsky jsou pohlcovány vodou, z níž jsou živé tkáně z velké části tvořeny, a proto tyto paprsky dokážou projít pouze několika milimetry této živé tkáně. Z této skutečnosti plyne, že THz paprsky rentgen v lékařském zobrazování nejspíše nikdy zcela nenahradí, ale mohou být užitečným pomocníkem při detekci rakoviny kůže či prsu. U těchto druhů rakoviny se buňky zasažené rakovinou vyskytují na povrchu kůže či těsně pod ním (hloubky, do kterých jsou THz paprsky ještě schopny proniknout) a my můžeme při jejich detekci využít skutečnosti, že rakovinou zasažené buňky obsahují jiné procento vody než zdravé buňky, což jsou THz paprsky schopné rozeznat.

V medicínském zobrazování má dále THz záření potenciál nahradit rentgen v zubním lékařství. Pro účinný boj se zubním kazem je důležité jeho včasné rozpoznání. THz záření může tento kaz odhalit dříve než rentgenové paprsky, a navíc není pacient vystaven škodlivému ionizujícímu záření.

3.2 Bezpečnostní skenování (zobrazování)

Pro bezpečnostní komunitu je nejdůležitější aplikací THz záření tzv. bezpečnostní skenování osob. Přesněji řečeno, THz záření je schopno odhalit předměty ukryté pod šaty dané osoby, čehož bude dříve nebo později využíváno na letištích či v jiných důležitých budovách (např. vládní budovy, nádraží atd.). Více o této problematice se práce zabývá v kapitole 6.

3.3 Vědecké využití a zobrazování

Spektroskopie pomocí terahertzových frekvencí by mohla poskytnout nové informace v chemii a biochemii. Metoda Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz TDS) neboli Terahertzová spektroskopie v časové oblasti je schopna provádět měření (a vytvořit snímky) na vzorcích, které jsou neprůsvitné pro viditelné a blízké infračervené spektrum. Tato metoda využívá skutečnosti, že hodně zajímavých látek má svůj charakteristický „spektrální otisk prstu“ právě v THz oblasti. Touto metodou můžeme tedy nejen detekovat, ale i přesně identifikovat velké množství léků, drog či výbušnin. Další výhodou této metody je, že produkované záření je širokopásmové, a proto mohou snímky obsahovat mnohem více informací než tradiční snímky vytvořené pomocí úzkopásmových zdrojů.

3.4 Průmyslové využití

Uvažuje se také o možnosti využití THz vlnění v průmyslové výrobě, např. pro kontrolu jakosti. V této oblasti by se využívalo schopnosti THz vlnění procházet plasty a lepenkou, což jsou nejběžnější obalové materiály, a tak pomocí tohoto záření prozkoumat obsah zabaleného zboží. Jinou možností je kontrola kvality polovodičovými čipů. Ty jsou totiž uzavřeny v neprůhledných plastových obalech, a jak již víme, THz záření plasty prostupuje, a tudíž je tato kontrola možná.

3.5 Kontrola raketoplánů

THz záření může být použito k odhalení drobných defektů v izolační pění palivových nádrží raketoplánů. Touto nedestruktivní metodou by mohla NASA (National Aeronautics and Space Administration) prověřovat každou palivovou nádrž raketoplánu před jeho startem. Při vyhledávání vzduchových bublinek a separací pěny v laboratorních podmínkách vykázalo THz záření lepší výsledky než rentgenové záření či ultrazvuk. [12]

4 ZDROJE THZ VLNĚNÍ

4.1 Přirozené THz zdroje

THz záření je přirozeně vyzařováno všemi subjekty s teplotou vyšší než 10 K jako součást Black Body Radiation (záření černého tělesa). Záření v tomto spektrálním rozsahu je ale poměrně slabé – méně než $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Pasivní detekce tohoto vyzařování je tedy obtížná vzhledem k potřebě velmi citlivých detektorů. Z toho důvodu se ve většině aplikací bude využívat aktivních zdrojů s následnou detekcí odraženého, či prošlého záření.

4.2 Umělé THz zdroje

Elektromagnetické pole má obrovský rozsah. Celé toto spektrum je z hlediska možnosti generování různých kmitočtů rozděleno na dvě základní části: *electronics* a *optics*. První skupinu můžeme přeložit jako radiotechnika, elektrotechnika či elektronika. U druhé skupiny je překlad jednoznačnější – optika. Terahertzová mezera leží právě mezi těmito základními částmi spektra.

Nejvýznamnějším omezením THz systémů byl (nebo stále je) nedostatečný výkon, nedostatek zdrojů pracujících při pokojové teplotě a často také jejich velikost. V posledním desetiletí se ale vlivem výzkumné činnosti objevují nové a nové slibné přístupy, které mají potenciál přiblížit THz technologii každodennímu používání.

Efektivní záření v oblasti mikrovlnných kmitočtů je možné produkovat pomocí oscilačních obvodů založených na vysokorychlostních tranzistorech. Při dosahování frekvencí v THz pásmu již ale tyto zdroje nepracují stejně dobře. To je dáno především potřebou velmi krátkých průletů nosičů náboje aktivními oblastmi, jejichž miniaturní rozměry pak omezují účinnou disipaci tepla. Tím se dramaticky snižuje účinnost zdrojů v THz spektrální oblasti. Tranzistory a další elektrická zařízení založená na elektrickém přenosu mají v zásadě limit okolo 300 GHz, ale prakticky jsou omezeny již na 20 – 50 GHz. Jak již bylo řečeno, zařízení pracující s vyšší frekvencí pracují velmi neefektivně. Nižších THz frekvencí je možné dosáhnout rovněž postupným násobením frekvence mikrovlnného oscilátoru pracujícího v oblasti 10-20 GHz. Výstupní výkon ale rychle klesá s použitím každého dalšího směšovače.

Standardní optické metody generování záření jsou založeny na zářivých přechodech mezi jednotlivými energetickými hladinami materiálů sloužících jako zdroje. Intenzita tepelných

(nekoherentních) zdrojů se rychle snižuje s rostoucí vlnovou délkou záření a je v sub-THz oblasti zcela nedostatečná. Polovodičové laserové diody jsou založeny na mezipásmové zářivé rekombinaci nositelů a vzhledem k absenci vhodných polovodičů s dostatečně úzkým zakázaným pásem se nedají použít pro dalekou infračervenou oblast spektra. [13][14][15]

Naštěstí se v poslední době podařilo vyrobit velmi malé polovodičové lasery operující na THz frekvencích. V těchto laserech se používá naprosto nový princip, který se spoléhá na kvantovou mechaniku. Těmto zařízením se říká Kvantové kaskádové lasery (Quantum Cascade Laser – QCL). Tyto lasery mohou pracovat při frekvencích směrem dolů až k 1 THz, ale potřebují být velmi dobře chlazeny (viz. dále).

THz zdroje mohou být tříděny na:

- Nekoherentní (tepelné) zdroje – širokopásmové pulzní zdroje (optické generování)
- Úzkopásmové spojité (CW - Continuous wave) zdroje (elektronické zdroje a QCL)

4.2.1 Širokopásmové zdroje

Než se dostaneme k samotným typům širokopásmových zdrojů, je dobré na tomto místě zmínit, že všechny tyto zdroje mají uplatnění ve spektroskopii v časové oblasti (Terahertz Time-Domain Spectroscopy - THz TDS), která je popsána v kapitole 6.1.

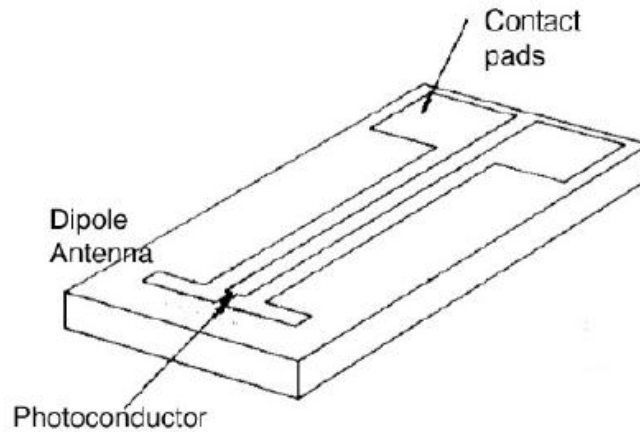
Většina širokopásmových pulzních THz zdrojů je založena na excitaci (buzení) různých polovodičových materiálů pomocí ultrakrátkých femtosekundových (10^{-15} s) laserových pulsů z titan-safírového laseru. Za zmínku stojí dvě nejběžnější optické metody generování širokopásmového THz záření, a to:

- Fotovodivostní emitory (Photoconduction či Photoconductive emitters)
- Optické usměrňování (Optical rectification)

4.2.1.1 Fotovodivostní emitory (Photoconductive emitters)

U této techniky vytváří optický laserový puls (délka trvání je 100 fs nebo méně) nosiče (páry elektron-díra) v polovodičovém materiálu. Přesněji řečeno, laserový puls je zaměřen na velmi úzkou mezeru (10 μ m) dipólové antény vytvořené na polovodičovém substrátu. Za předpokladu, že energie fotonů je větší než odstup pásma polovodiče, vytvoří se páry elektron-díra a polovodič se tak mění z izolantu na vodič. Pokud je aplikováno dostatečně velké předpětí (např. 40 V), jsou elektrony urychleny, čímž se vznikne proud, který

produkuje THz elektromagnetické vlny. Tento proces typicky probíhá při velmi nízkých teplotách (pod $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) a nejslibnějším materiálem je GaAs, protože má vysoký měrný odpor při zachování rozumné efektivity nosičů. [16]



Obrázek 6: Anténní struktura. Kontaktní plošky a anténa jsou z křemíku. [1]

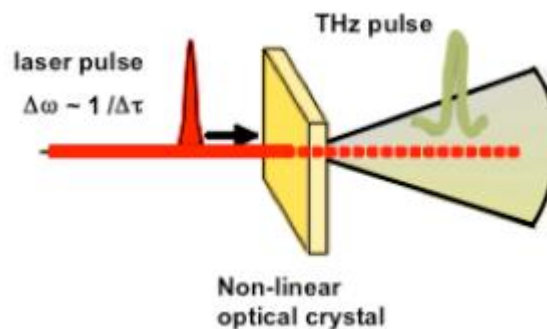
Pro osvětlování polovodiče se používá nejčastěji titan-safírový laser s energií pulsů okolo 10 nJ. Při použití metody zesilování ultrakrátkých laserových pulsů, známou pod zkratkou CPA (Chirped Pulse Amplification), lze dosáhnout energie okolo 1 mJ. Tato metoda vyžaduje vytvoření dvou speciálních svazků, tzv. signálový a čerpací, a zajištění jejich velmi přesné časové a prostorové synchronizace v opticky nelineárním krystalu. Signálový svazek je velmi slabý, avšak širokospektrální. Jeho zdrojem je právě zmiňovaný femtosekundový titan-safírový laser. Svazek je prodloužen z femtosekund na stovky pikosekund a dopadá pod určitým úhlem na opticky nelineární krystal. Ve stejném okamžiku přichází čerpací puls z jiného laseru (např. jódový fotodisociační laser). V procesu parametrického zesílení předá čerpací svazek energii signálovému svazku. Signálový svazek je proto po opuštění krystalu velmi silný a zároveň širokospektrální. Poté je laserový svazek adekvátně zkrácen, a to téměř na původní délku.

4.2.1.2 Optické usměrňování (Optical rectification)

U této metody prochází skrz transparentní krystal intenzivní ultrakrátký laserový puls, který emituje THz pulsy bez jakéhokoliv přiloženého napětí. Je to nelineární optický proces, kde je vhodný krystal rychle elektricky polarizován při vysokých optických intenzitách. Tato měnící se elektrická polarizace emituje THz záření. Protože je nutná vysoká intenzita laseru, tak se pro tuto techniku opět používá zesílený titan-safírový laser.

Typické používané krystalové materiály jsou tellurid zinečnatý (zinc telluride), fosfid gallií (gallium phosphide) a galium selenid (gallium selenide).

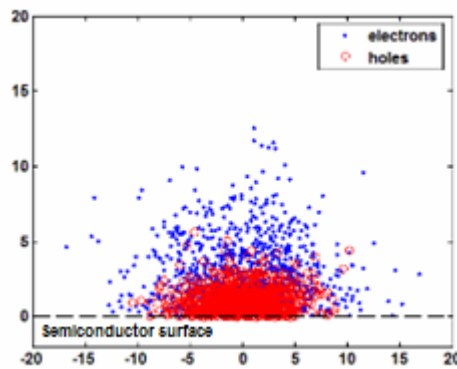
Šířka pásma pulsů generovaných optickým usměrňováním je limitována délkou laserového pulsu, absorpcí THz vln v krystalu, tloušťkou krystalu a nepřizpůsobením mezi fázovou rychlostí laserového pulsu a THz pulsu uvnitř krystalu. Silnější krystal bude generovat vyšší intenzitu, ale nižší frekvenci. Touto technikou je možné generovat frekvence okolo 2 THz (150 μm). [16]



Obrázek 7: Optické usměrňování
v nelineárním optickém krystalu [1]

4.2.1.3 Povrchové emitory (Surface emitters)

Pokud ultrakrátký (100 femtosekundový nebo kratší) optický puls osvětluje polovodič a jeho energie (tedy určitá vlnová délka či frekvence) je větší než energie odstupů pásma materiálu, generují se pohyblivé nosiče. Vzhledem k tomu, že absorpce pulsu je exponenciální proces, většina nosičů je generována blízko povrchu (obvykle do 1 μm). Tato blízkost (přítomnost) povrchu vytváří narušení symetrie, z čehož vyplývá, že nosiče jsou schopné pohybu jen do určité části polovodiče. Kombinace tohoto jevu s odlišnou pohyblivostí elektronů a děr vytváří dipól. Tento jev je znám jako Photo-Dember efekt a je zvláště výrazný např. v InAs, který se vyznačuje vysokou pohyblivostí nosičů.



Obrázek 8: Photo-Dember efekt [17]

4.2.2 Úzkopásmové zdroje

Vzhledem ke skutečnosti, že hlavním zástupcem této kategorie zdrojů je kvantový kaskádový laser, uvedu, jakým způsobem pracuje a z čeho se skládá klasický laser, čímž poté vynikne rozdíl mezi klasickými lasery a tímto novým typem kaskádového laseru.

Laser je obvykle definován jako zdroj koherentního elektromagnetického záření nejčastěji ve viditelném spektru a v přilehlých oblastech (infračervené a UV záření). Laserové záření vzniká konverzí některého druhu energie (např. elektrické, optické, chemické) na záření. Účinnost této přeměny je od zlomku procenta do více než osmdesáti procent (polovodičové lasery), podle typu laseru.

Laser se obecně skládá ze tří základních částí:

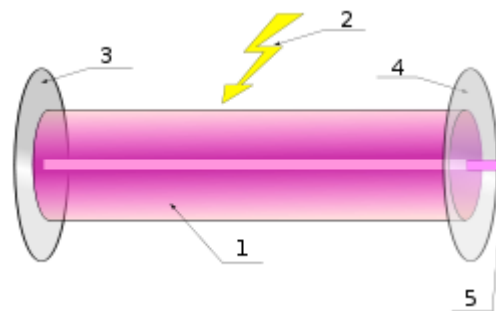
- 1) aktivní prostředí – vhodná látka, která při dodání jisté energie v příhodné formě (čerpání elektrickým proudem, světelným zářením výbojky či jiného laseru apod.) může vysílat světelné záření; takovou látkou může být:
 - pevná látka s příměsemi (krystal, sklo, polovodič)
 - kapalina (barvivové lasery)
 - plyn nebo směs plynů (CO^2 , He+Ne)
- 2) optický rezonátor – přispívá k zesílení, zvyšuje monochromaticnost a směrovost, obvykle je tvořen zrcadly
- 3) zdroje budící energie

Princip laseru je již zakódován v jeho názvu: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření). Vnější buzením (2) přechází elektrony ze základního do vyššího energetického stavu, z něj rychlým přechodem relaxují do poněkud nižšího (metastabilního) stavu, kde může přetrvat po dobu (tzv. dobu života

excitovaného stavu) relativně dlouhou ve srovnání s rychlostí absorpce a relaxace. Za takové situace je možno dosáhnout inverze populace (inverze obsazení hladin), kdy se ve vybuzeném stavu nachází větší množství elektronů než kolik jich je ve stavu energeticky nižším.

Foton, který má vhodnou vlnovou délku, neboli energii, a je buď spontánně (samovolně) generovaný v aktivní oblasti (1), nebo přiletí z vnějšku, interaguje s vybuzenými elektrony tak, že při přeskocích těchto elektronů zpět na nižší energetické hladiny vzniká nový foton stejných parametrů (barva, směr, polarizace, fáze), jaké měl foton stimulující. Jinými slovy, z vhodného vnějšího zdroje energie se v laseru lavinovitě tvoří identické fotony a jsou emitovány stejným směrem.

Dále je třeba vyřešit problém, jak udržet fotony uvnitř aktivního prostředí dostatečně dlouhou dobu, aby se v něm nahromadilo co nejvíc energie. Aktivní prostředí je tedy uzavřeno do tzv. optického rezonátoru. Rezonátor je typicky tvořen dvěma zrcadly, z nichž jedno je totálně odrazné (3) a druhé polopropustné (4). Fotony vznikající stimulovanou emisí se tak odrážejí od zrcadel sem a tam (pro určité frekvence je tento pohyb téměř bezztrátový), stimulují další vybuzené elektrony a intenzita světla uvnitř rezonátoru postupně narůstá. Po dosažení určité meze vyzáří laserový paprsek (5) skrz polopropustné zrcadlo. [18]



Obrázek 9: Princip laseru [19]

4.2.2.1 Kvantový kaskádový laser (Quantum Cascade Laser – QCL)

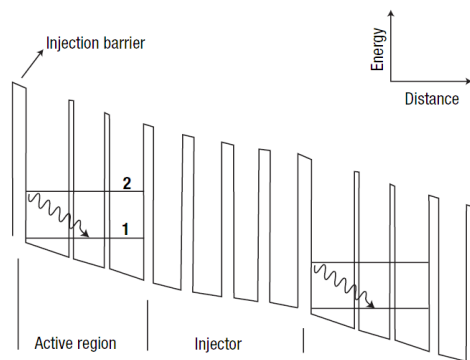
Kvantový kaskádový laser (QCL) je polovodičový laser a pracuje stejně jako většina druhů laseru na principu kvantových přechodů. Prostředí, v němž k těmto jevům dochází, se skládá z nesmírně tenkých vrstev dvou polovodičových materiálů (v řádech nanometrů). První QCL byl vyvinut v roce 1994 v Bell Laboratories a pracoval při frekvenci 70 THz. V roce 2002 byl již představen QCL s frekvencí 4,4 THz (a výkonem 250 mW) a nyní

existuje dokonce QCL, který operuje na frekvenci 1,5 THz, jeho výkon již ale klesá na hodnotu o něco nižší než 100 mW. To je ale dostatek energie k vytvoření snímku předmětu vzdáleného několik metrů. [20]

Na rozdíl od laserových diod, kde je emise fotonů dosaženo rekombinací páru elektron-díra přes zakázané pásmo, u QCL jsou do emise zapojeny pouze elektrony a přechody se vyskytují uvnitř dílčích pásem v opakujících se vrstvách speciálně zkonstruované heterostruktury. Tato heterostruktura se skládá z pravidelné řady tenkých vrstev různých materiálů. Vhodným návrhem tloušťky vrstev je možné konstruovat inverzi populace mezi dvěma dílčími pásmy, což je nutné k dosažení laserového záření. U laserových diod může jeden elektron vygenerovat jeden foton, u QCL ale elektron vyzáří foton vždy při průchodu jednou periodou heterostruktury. Elektron tedy nevyzařuje foton pouze jednou, jako v dosavadních laserech, ale vícekrát, v jakýchsi kaskádách.

Tento zdroj se vyznačuje tím, že je velmi malý, a proto má pro budoucí THz aplikace velký potenciál. Jako každý jiný zdroj ale má svůj problém a tím je to, že QCL pracují pouze při velmi nízké teplotě. Je to dáno tím, že v důsledku proudů okolo 1 A, vzniká na velmi malé oblasti velké teplo, které způsobuje zničení struktury. V pulzním režimu dosahují pracovní teploty hodnot okolo 170 K, kdežto u spojitého vyzařování je tato hodnota ještě nižší, přibližně 120 K. Výzkum samozřejmě postupuje dále a tyto hodnoty se mohou (a budou) v blízké budoucnosti zvyšovat a stále více přibližovat pokojovým teplotám.

Pro THz oblast se ukázal jako nejlepší materiál GaAs/AlGaAs, kdy substrát je složen z materiálu GaAs (arsenid gallitý) a potenciálové bariéry jsou tvořeny materiálem AlGaAs. Pro svoji mimořádně složitou strukturu a neobyčejně vysoké požadavky na přesnost tloušťky a složení jednotlivých vrstev se patrně jedná o nejkomplicovanější průmyslově vyráběnou součástku skládající se ze stovek vrstev. Heterostruktury QCL jsou u každého výrobce samozřejmě trochu odlišné, ale pro představu uvedu, že v heterostruktuře bývá zpravidla 104 až 120 period, přičemž každá perioda se skládá z přibližně 7 jímek.



Obrázek 10: Struktura kvantového kaskádového laseru [21]

4.2.2.2 Laser na bázi volných elektronů (Free - electron laser – FEL)

Tento typ laseru se svým principem zcela liší od jiných typů laserů. Elektromagnetické záření vytvořené tímto laserem je o několik řádů vyšší než u jiných zdrojů, ale jejich nevýhodou je obrovská velikost, a také cena.

Lasery s volnými elektrony používají paprsek elektronových svazků velké rychlosti, který se šíří vakuem. Tento paprsek musí být v urychlovači urychlen na rychlost blízkou rychlosti světla. Svazky elektronů pak dále prochází prostorovým kolísavým (sinusovým) magnetickým polem, které způsobuje, že elektrony oscilují a emitují fotony. Vlnová délka emitovaného záření může být ovlivněna návrhem magnetického pole.

4.2.2.3 Elektronické zdroje

Poslední způsob generování, který uvedu, spočívá v rozšíření pásma frekvencí, které je možno získat elektronickými zdroji, jako jsou vysokorychlostní tranzistory či diody. U těchto součástek klesá drasticky výstupní výkon již při frekvencích v řádech desítek gigahertz. Vhodným návrhem lze ale vytvořit systém, který základní frekvenci vynásobí, čímž je možno se dostat na frekvence alespoň pár stovek gigahertz. Použitím každého dalšího násobiče, ale opět klesá účinnost celého systému.

Společnost Virginia Diodes, která se specializuje na součástky generující milimetrové a terahertzové frekvence již nabízí solid-state zdroj s frekvencí 1,26 – 1,31 THz. Průměrný výkon tohoto zdroje se pohybuje okolo 10 μW . U 600 – 665GHz zdroje je hodnota výkonu rovna přibližně 40 μW , pro 510 – 550GHz zdroj je to již 400 μW a u 210-270GHz zdroje je možno dosáhnout hodnoty výstupního výkonu kolem 2 mW.

5 DETEKCE THZ VLNĚNÍ

Nízký výstupní výkon THz zdrojů ve spojení s relativně vysokými hodnotami tepelného přirozeného pozadí v THz spektrálním rozsahu vyžaduje velmi citlivé detekční metody. Detekční metoda je určena použitou metodou generování THz záření.

Detekce THz záření si vyžaduje velmi citlivé metody, protože zdroje vykazují nízké výkony a tepelné přirozené pozadí je poměrně vysoké. Pro širokopásmovou detekci jsou běžně používány přímé detektory založené na tepelném pohlcování. Většina těchto systémů vyžaduje chlazení k redukci tepelného pozadí. Běžně používané systémy jsou héliem chlazené křemíkové, germaniové a InSb bolometry. Jelikož mohou bolometry měřit pouze celkovou energii THz pulsu, spíše než elektrické pole v průběhu času, není toto schéma vhodné pro využití v THz TDS.

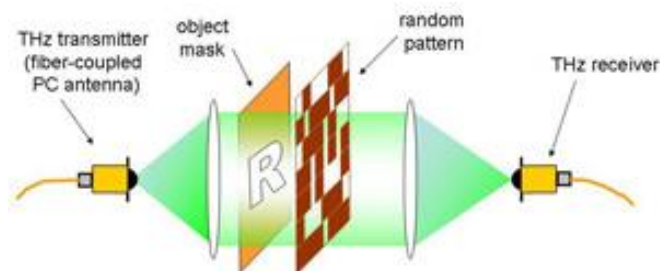
Bolometry měří vyskytující se elektromagnetické záření na základě jeho absorpce. Přesněji řečeno je to detektor tepelného (nejčastěji infračerveného) záření pracující na principu měření změny elektrického odporu v závislosti na změně teploty čidla bolometru v důsledku absorpce záření. Extrémně citlivé bolometry jsou založeny na stavové změně supravodiče, jako je niob. Jestliže je vyžadováno vysoké spektrální rozlišení, používají se heterodynové (záznějové, směšovací) senzory. V těchto systémech je požadovaná frekvence produkována oscilátorem a smíšena s externím signálem. Získaný signál je pak zesílen a měřen.

Pro impulsní THz detekci v THz TDS systémech jsou vyžadovány koherentní (spojité) detektory. Pro měření THz pulsu v THz TDS mohou být použity dvě detekční metody: fotovodivostní detekce a elektrooptické vzorkování ve dvojlomných krystalech. U fotovodivostní detekce je princip podobný fotovodivostnímu generování, jen vše probíhá opačně. Přítomnost THz elektrického pole tedy generuje v anténním přijímači vytvořeném na polovodičovém substrátu proud, který je obvykle zesílen použitím zesilovače. Tento zesílený proud je měřeným parametrem, který odpovídá intenzitě THz pole. U elektrooptického vzorkování se využívá Pockelsova jevu, což je fotoelektrický jev, kdy se určité krystalové materiály stávají v přítomnosti elektrického pole dvojlomné. Dvojlom způsobený elektrickým polem THz pulsu vede ke změně optické polarizace detekovaného pulsu. Právě tato změna polarizace je úměrná intenzitě elektrického pole. Pomocí polarizátorů a fotodiod je tato změna polarizace měřena. [1][14][22]

5.1 Jednapixelová kamera

Jinou možností je použití tzv. jednapixelové kamery (single-pixel camera). Tato kamera byla vytvořena týmem inženýrů z Rice University a je založena na použití speciální matematiky a křemíkovém čipu pokrytém stovkami tisíc zrcadel (DMD) o velikosti bakterie (tedy v řádech mikrometrů). Na rozdíl od megapixelové kamery, která zachycuje milion světelných bodů pro každý snímek, tato kamera vytváří obraz zachycením jediného světelného bodu (pixelu), a to několik tisíckrát za sebou. Tyto mikrozrcadla jsou schopné se otočit pouze do dvou směrů, přičemž v jednom směru se jeví jasné a v druhém směru tmavé, takže když se na ně „dívá“ počítač, vidí je jako jedničky nebo nuly. V jednapixelové kameře je obraz z objektivu nasvícen na DMD, od kterého se odrazí směrem k druhému objektivu, který odražené světlo zaměřuje na jedinou fotodiodu. Zrcadla na DMD se náhodně vytáčejí, a to pro každý nový vzorek. Vždy, při natočení zrcadel, je zaznamenána nová hodnota pixelu fotodiodou. Z těchto získaných hodnot lze speciální matematikou sestavit snímek dané scény.

Výhodou této technologie by mohla být cena, poněvadž pro některé vlnové délky vně viditelného spektra (tedy i pro THz) je vytvoření velkého pole detektorů příliš drahé – tento systém ale vyžaduje pouze jeden detektor. Ke konci roku 2008 byl představen model kamery přímo pro THz frekvenční rozsah a v daném článku bylo uvedeno, že pomocí této technologie je možno získat snímek do 10 sekund. V této „THz verzi“ byla ale mikrozrcadla nahrazena sérií měděných plíšků, kterých bylo na čip implementováno 600. Ve fázi výzkumu je dále zkoumána možnost využití pole speciálních metamateriálů, které se stávají neprůhledné pro THz záření, jestliže je na nich aplikováno elektrické napětí. Tím by bylo možno dělat stejný úkol jako mikrozrcadla či měděné plíšky elektricky, a tudíž velmi rychle. [23][24]



Obrázek 11: Schéma jednapixelové kamery [24]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 BEZPEČNOSTNÍ APLIKACE TERAHERTZOVÉHO ZÁŘENÍ

V bezpečnostní komunitě se ve spojitosti s terahertzovým zářením hovoří převážně o dvou možných využitích. Prvním z nich je bezpečnostní prověřování osob na kontrolních stanovištích, převážně na letištích. Hlavním cílem této aplikace je odhalování skrytých kovových i nekovových zbraní pod šaty pasažéra. Pro odhalování skrytých zbraní je možno využít jak aktivní, tak pasivní technologie. Druhým způsobem využití je detekce a identifikace zakázaných látek, tedy převážně výbušnin a drog.

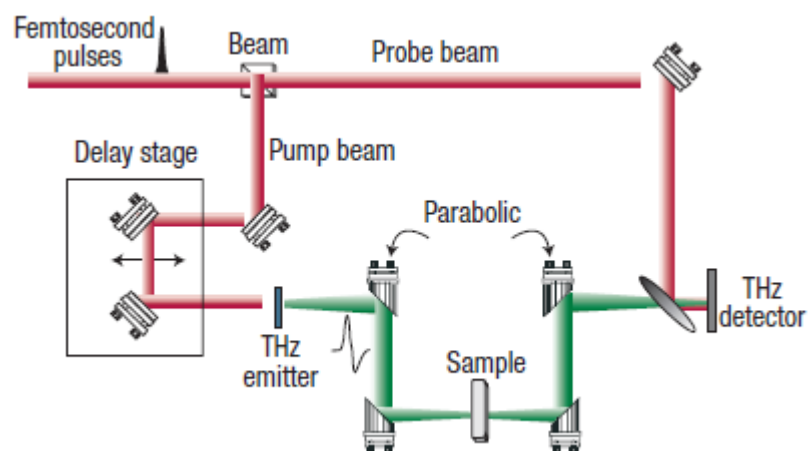
Po teroristickém útoku, kdy se občan Nigérie pokusil 25. prosince 2009 odpálit nálož v letadle směřujícího z Amsterdamu do Detroitu, se opět rozvířila debata o bezpečnostních opatřeních. Konkrétně se vede debata o používání tělesných skenerů. Útočník ke svému útoku použil látku pentrit, přesným chemickým označením pentaerythritetranitrát, což je silná výbušnina, běžně označovaná zkratkou PENT či PETN. Vzhledově se jedná o bezbarvou krystalickou látku a útočník ji měl ukrytou na horní části stehna. Klasickou bezpečnostní procedurou nemohla být látka odhalena. Rám, který slouží pro zjišťování kovových předmětů, ani rentgenové paprsky nemají schopnost takové látky odhalovat (rentgenové paprsky zmiňují proto, že je to jedna z dalších nových technologií, která bude popsána v dalším textu). Řešením by mohl být právě terahertzový tělesný skener. Jak bylo výše popsáno, většina látek (drogy, výbušniny, chemické sloučeniny atd.) má v THz frekvenčním pásmu svůj spektroskopický podpis. Při průchodu útočníka THz detektorem by tedy přístroj zaregistroval tuto, pro něj zatím neznámou, látku. Porovnáním této látky s databází by následně zjistil, o jakou látku se jedná a tento náález by signalizoval obsluze, která by již podnikla příslušná opatření.

Je ale pravdou, že při zaznamenaných pokusech o teroristické útoky se pachatelé snažili dostat nejrůznější tekutiny a látky na palubu nikoliv na svém těle, ale právě v příručních zavazadlech. Tělesné skenery jsou pak zcela neúčinné, proto je nutné věnovat pozornost také kontrole zavazadel. Dalším nepříjemným faktem je, že jednoduchou nálož lze sestavit i po nákupu v drogerii v letištní budově.

6.1 Terahertzová spektroskopie v časové oblasti

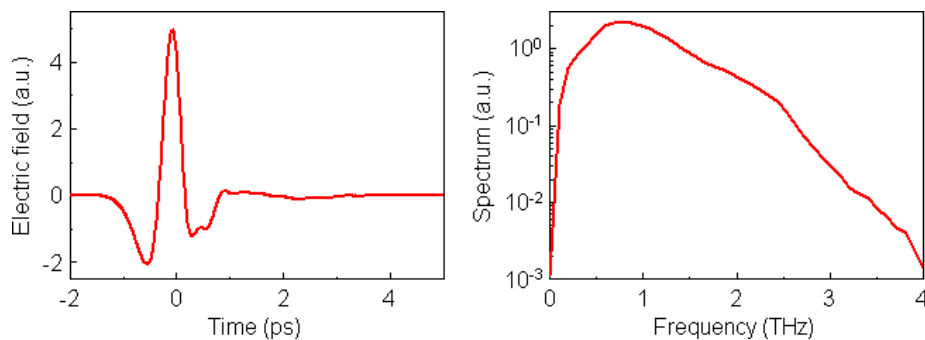
Terahertzová spektroskopie v časové oblasti (Terahertz Time-Domain Spectroscopy – THz TDS) je spektroskopická technika, kde je ke zkoumání materiálových vlastností použito speciální schéma využívající krátké pulsy THz záření. Mnoho zajímavých

materiálů má totiž svůj unikátní spektrální „otisk prstu“ v THz rozsahu, takže THz záření může být použito k jejich identifikaci. K této identifikaci se využívá energetických změn molekul (zvláště rotačních) při interakci záření s danou látkou. Tato interakce může být transmisní, reflexní či emisní, podle čehož pak také vypadá schéma celého systému. Způsob detekce umožňuje přímo měřit časový průběh elektrického pole THz pulsu (na rozdíl od obvyklých optických metod, které dovolují získat pouze energetické veličiny: výkon, energii v pulsu apod.). Tím je možno pro každou frekvenční složku obsaženou v širokém spektru pulsu určit nejen její amplitudu, ale i její relativní fázi vůči ostatním složkám – říkáme, že detekce je fázově citlivá.

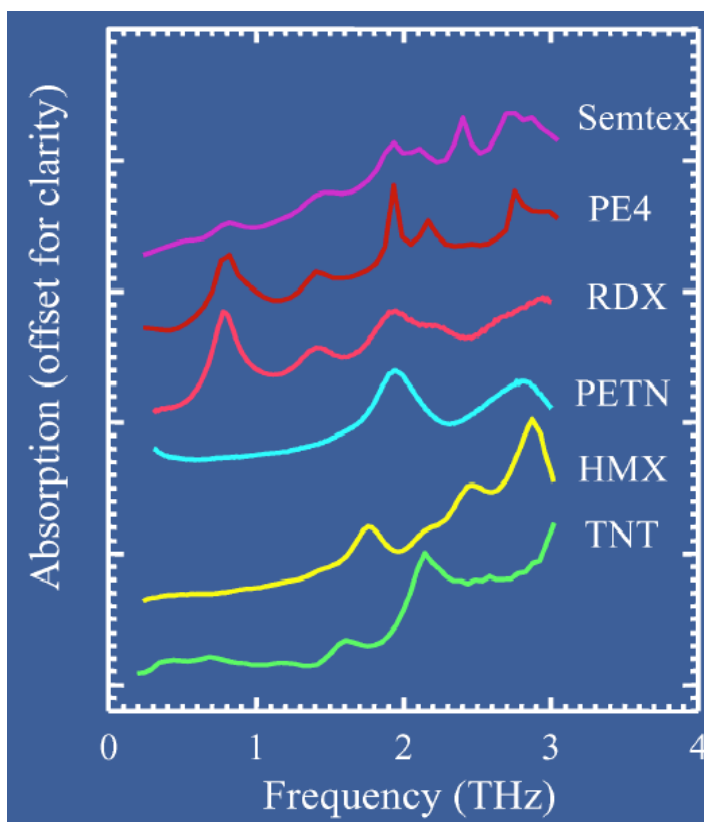


Obrázek 12: Schematické uspořádání při THz TDS [21]

Jak již bylo dříve zmíněno, u THz TDS se využívá širokopásmových zdrojů, které jsou založeny na ultrakrátkých femtosekundových (10^{-15} s) pulsech z titan-safírového laseru. THz puls o délce přibližně 1 ps (10^{-12} s) může obsahovat frekvenční složky pokrývající celý THz rozsah od 0,1 do 3 THz. V THz TDS je elektrické pole THz pulsu v detektoru ovlivňováno mnohem kratším laserovým pulsem (např. 0,1 ps), a to způsobem, který produkuje elektrický signál úměrný elektrickému poli THz pulsu v době výskytu laserového pulsu v detektoru. Opakováním tohoto postupu a různým načasováním hradlování laserového pulsu je možné skenovat THz puls a sestavit jeho elektrické pole jako funkci času. Následně je použita Fourierova transformace, díky které získáme z časové oblasti frekvenční spektrum.



Obrázek 13: Puls získaný THz TDS (vlevo), frekvenční spektrum získané Fourierovou transformací (vpravo) [25]



Obrázek 14: Terahertzové spektrální otisky některých druhů výbušnin [26]

6.2 Terahertzové zobrazování

Terahertzový zobrazovací systém může být pasivní nebo aktivní. Pasivní terahertzový systém jednoduše detekuje terahertzovou část tepelného vyzařování těles. Aktivní systém ozařuje zkoumaný objekt zdrojem THz záření a zobrazuje buď záření objektem prošlé, nebo záření od objektu odražené. Zatímco pasivní systémy mohou být efektivními pro dvojdimensionální zobrazování milimetrových vlnových délek (okolo 100 GHz),

chemická/strukturální analýza podezřelých položek je vyhrazena vyšším frekvencím, protože u pevných látek prakticky neexistují spektrální charakteristiky pod 500 GHz. Aktivní techniky jako THz pulzní zobrazování a terahertzové zobrazování stálou vlnou (CW – Continuous-Wave) mohou být několikrát citlivější a navíc umožňují třírozměrné zobrazování využitím analýzy doby letu.

Experimentální data uváděná v literatuře poukazují na skutečnost, že mnoho materiálů, které můžeme z bezpečnostního hlediska považovat za důležité, má specifické transmisní a reflexní THz spektrum. Součásti oděvů, papírové a plastové balící materiály jsou v THz spektru transparentní (průhledné). Přesněji řečeno, procházející THz záření těmito materiály z velké části projde dále a pouze malé procento jeho energie se absorbuje či odrazí. Naopak kovy THz vlny téměř stoprocentně odrážejí. Keramické nože a střelné zbraně THz záření částečně odrážejí. Kovové a plastické nože mají ostré hrany, což umožňuje tyto předměty na THz snímku identifikovat. Pokožka je z velké části tvořena z vody, a to je důvod proč absorbuje téměř všechno THz záření. Energie záření se pak neškodně ztratí ve formě tepla na prvních stovkách mikrometrů pokožky.

THz snímky mají prostorové rozlišení omezené difrakcí, a tak se hodnota tohoto rozlišení typicky pohybuje okolo 1 mm. I když se tato hodnota může zdát vysoká, pro bezpečnostní skenování je tato hodnota pro rozeznání tvarů nožů a ručních střelných zbraní dostatečná.

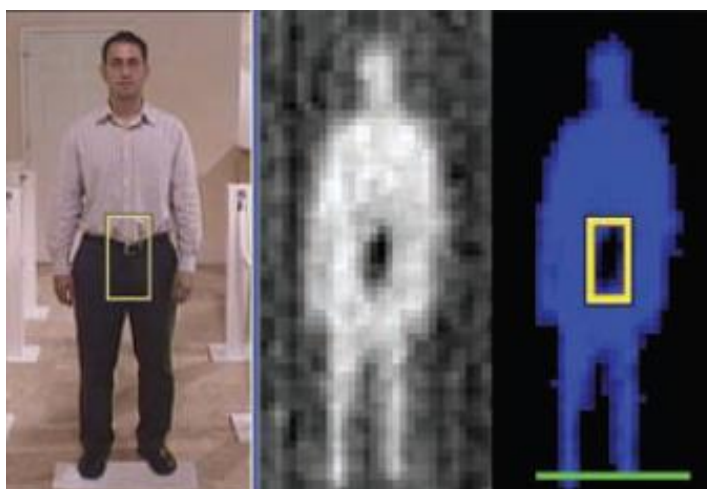
Pro bezpečnostní praxi je mnohem perspektivnější reflexní terahertzová spektroskopie, protože THz záření lidským tělem, které obsahuje velké množství vody, vůbec neprojde. Při reflexním uspořádání je kontrolovaná osoba ozářena THz zdrojem, záření prostupuje oblečením, odráží se od ukrytého předmětu, prostupuje opět oblečením a je detekováno. Kvůli tomu je nutné se zabývat také transmisní absorpcí THz vln materiály bariér (oděvů, obalových materiálů). Tyto materiály budou svojí absorpcí THz záření samozřejmě zeslabovat a při určité tloušťce jej prakticky pohltí úplně.

6.3 Pasivní zobrazování

Jak je již v této práci zmíněno, pasivní detekce spočívá v detekci terahertzové části tepelného vyzařování. Za všechny zde zmíním detektor vyvinutý společností Rapiscan, jež nese název WaveScan 200. Přístroj detekuje milimetrové vlny v rozsahu 80 až 100 GHz a odhaluje skryté předměty (velké výbušniny, kapaliny a gely) na vzdálenost několika metrů za přibližně půl sekundy, přičemž neodhaluje anatomické detaily.



Obrázek 15: Rapiscan
WaveScan 200 [27]



Obrázek 16: Snímky získané pasivní detekcí
milimetrových vln [27]

6.4 Bezpečnostní skenování osob

Všudypřítomné detektory kovů spolehlivě odhalí skryté kovové předměty, ale nerozeznají nekovové zbraně, výbušniny, drogy atd. Pro prohlídku zavazadel lze poměrně efektivně využít rentgenové záření, které ale nelze použít pro skenování osob, a to ze zdravotních důvodů. Z tohoto důvodu je snaha posílit bezpečnostní opatření tzv. tělesnými skenery. Jejich využívání může zcela jednoznačně posílit bezpečnostní opatření při předletových kontrolách na letištích, a časem určitě nejen zde, ale také na kontrolních stanovištích u vstupů do vládních či soudních budov, nápravných institucí a jiných komerčních budov.

Proti využívání těchto skenerů se ale po celém světě staví zástupci různých organizací chránící soukromí lidí. Těmto odpůrcům vadí skutečnost, že na snímcích získaných těmito skenery mohou být viděny detaily těla skenované osoby. Argumentují tím, že pořizování takových snímků je zásahem do soukromí cestujících, a že tyto snímky mohou být následně zneužity. Proto byla vytvořena určitá pravidla celé prohlídky, která mají za úkol zabránit jakémukoliv zneužití těchto snímků.

6.4.1 Postupy zabráňující narušení soukromí

Jak bylo zmíněno, při používání bezpečnostních skenerů jsou stanovena přísná bezpečnostní opatření, které chrání soukromí a zajišťují anonymitu. Jak tedy celá kontrolní procedura vypadá? Cestující přistoupí k terminálu a na pokyn obsluhy terminálu se postaví na určené místo, které je vyznačeno na podlaze. Jakmile stojí pasažér na určeném místě, je obsluhou vyzván k zaujmutí požadovaného postoje (ukázáno na obrázku 19), který spočívá ve zdvihnutí obou rukou směrem k hlavě nebo nad hlavu tak, aby nebylo možno zakrýt žádný předmět mezi rukou a tělem. V tomto postoji stojí pasažér nehybně přibližně 2-3 s, během kterých je jeho tělo naskenováno. Poté může, opět na pokyn obsluhy, terminál opustit druhou stranou. Získané snímky jsou zpracovány počítačem a výsledná data zobrazena na obrazovce počítače ve speciální vzdálené místnosti. Tyto výsledné snímky jsou kontrolovány dalšími pracovníky.

Soukromí cestujících je tedy v první řadě chráněno anonymitou, kdy jeden člověk obsluhy nikdy nemůže vidět zároveň cestujícího i jeho snímek. Toho je dosaženo tím, že osoba vyhodnocující snímky sedí u počítače v místnosti, která je od kontrolního místa dostatečně vzdálena. Jedná se o uzavřenou místnost, do které nemá nikdo kromě obsluhy přístup. Obsluha terminálu a vyhodnocující obsluha u počítače mezi sebou komunikuje pomocí bezdrátové náhlavní soupravy (tzv. headset). Jakmile vzdálená obsluha rozhodne, že pasažér u sebe nemá žádné předměty, které by mohly znamenat hrozbu, oznámí to do sluchátek obsluze asistující pasažérovi. Poté může pasažér pokračovat dále. Anonymita cestujících je tedy zajištěna dvěma základními opatřeními:

- obsluha terminálu, která cestujícímu pomáhá, nikdy nevidí vytvořené snímky
- osoba, která snímky prohlíží, se nachází ve vzdálené místnosti a nikdy nevidí cestujícího

Vytvořené snímky je sice téměř nemožné dle obličeje přiřadit dané osobě, ale tato nemožnost přiřazení snímku dané osobě je navíc zdůrazněna rozmazáním obličeje. Toto

opatření je dále znásobeno nemožností snímky jakkoliv ukládat, odesílat či tisknout. Každý zobrazený snímek je ze systému automaticky vymazán ihned poté, co je obsluhou označen jako „čistý“. Jedinou možností vzdálené obsluhy, jak zobrazené snímky získat, je použití fotoaparátu, kterým je možné obrazovku počítače vyfotit. Kvůli tomu má obsluha počítače zákaz nosit do místnosti jakékoliv zařízení umožňující záznam obrazu. Zde ale vyvstává otázka, jak a kdo může striktně dohlížet na dodržování tohoto opatření. Poslední možností, jak snímky získat, je jejich získání na přenosové cestě od terminálu k počítači. Přenosová cesta by tedy měla být zabezpečena proti napadení.

Na druhou stranu byl v různých diskuzích zaznamenán názor lidí, kteří se ptají, zdali má obsluha zapotřebí takové snímky získávat. A jestliže se podívám na obrázky 17 a 20, nemyslím si, že by měl kdokoliv zapotřebí s takovými snímky manipulovat. Samozřejmě s postupem času bude možné získat pomocí THz záření dokonalejší snímky, které můžou vypadat třeba jako na obrázcích 31 a 32, ale i tak je snímek v porovnání se skutečností hodně nezajímavý.

6.4.2 Jaké jsou možnosti cestujících?

Tyto pokročilé zobrazovací technologie jsou, alespoň prozatím, pro všechny cestující volitelné. Jelikož se jedná o novou technologii, je samozřejmě veřejnost v přístupu k ní opatrná a z toho důvodu jsou před každou skenovací jednotkou na bezpečnostních kontrolních stanovištích vyvěšeny cedulky informující pasažéry o dané technologii, včetně vzorových snímků. Cestující, kteří si nepřejí využít této prověřovací metody, se podrobí prověření na stejné úrovni, což znamená, že budou muset podstoupit osobní fyzickou prohlídku (tzv. pat-down). Informace z několika letišť, kde se již tyto terminály používají, říkají, že těmto pokročilým technologiím dává přednost až 98% cestujících, kteří se s touto technologií setkali.

Velmi spokojení s pokročilými zobrazovacími systémy jsou pasažéři s různými implementovanými zdravotnickými pomůckami, které často spouštěly detektory pro zjišťování kovových předmětů. Tento způsob je pro ně mnohem rychlejší a méně invazivní než fyzická prohlídka.

6.4.3 Platná legislativa v ČR

K dané problematice ohrožení soukromí cestujících se vztahuje zákon č. 101/2000 Sb., o ochraně osobních údajů. V §5 odst. 1 tohoto zákona je uvedeno, že správce (správcem je

každý subjekt, který určuje účel a prostředky zpracování osobních údajů, provádí zpracování a odpovídá za něj) je povinen provést několik úkonů, např.:

- stanovit účel, k němuž mají být osobní údaje zpracovány
- stanovit prostředky a způsob zpracování osobních údajů
- zpracovat pouze přesné osobní údaje, které získal v souladu s tímto zákonem
- shromažďovat osobní údaje odpovídající pouze stanovenému účelu a v rozsahu nezbytném pro naplnění stanoveného účelu
- uchovávat osobní údaje pouze po dobu, která je nezbytná k účelu jejich zpracování

Další důležitou částí tohoto zákona je §5 odst. 4, který zní následovně: Subjekt údajů musí být při udělení souhlasu informován o tom, pro jaký účel zpracování a k jakým osobním údajům je souhlas dáván, jakému správci a na jaké období. Souhlas subjektu údajů se zpracováním osobních údajů musí být správce schopen prokázat po celou dobu zpracování.

Po uplynutí doby, po kterou je možné osobní údaje uchovávat, je nutné tyto osobní údaje zlikvidovat, čímž se zabývá §20 odst. 1: Správce nebo na základě jeho pokynu zpracovatel je povinen provést likvidaci osobních údajů, jakmile pomine účel, pro který byly osobní údaje zpracovány, nebo na základě žádosti subjektu údajů podle § 21.

Z předchozích řádků vyplývá, že získané snímky je možné pořizovat pouze za souhlasu dané osoby a tyto snímky je nutné zlikvidovat ihned po jejich zhlédnutí a označení za „čisté“. Po celou dobu, kdy je snímek pasažéra vyhodnocován je správce povinen dodržovat ustanovení v §13. Ten říká, že správce a zpracovatel jsou povinni přijmout taková opatření, aby nemohlo dojít k neoprávněnému nebo nahodilému přístupu k osobním údajům, k jejich změně, zničení či ztrátě, neoprávněným přenosům, k jejich jinému neoprávněnému zpracování, jakož i k jinému zneužití osobních údajů. Dle odstavce 2 je správce nebo zpracovatel povinen zpracovat a dokumentovat přijatá a provedená technicko-organizační opatření k zajištění ochrany osobních údajů v souladu se zákonem a jinými právními předpisy. V části 4c je také uvedeno, že je správce povinen pořizovat elektronické záznamy, které umožní určit a ověřit, kdy, kým a z jakého důvodu byly osobní údaje zaznamenány nebo jinak zpracovány. [28]

Některá ustanovení uvedená v §5 není dokonce nutné dodržet za účelem zajištění:

- Bezpečnosti České republiky
- Obrany České republiky
- Veřejného pořádku a vnitřní bezpečnosti
- Předcházení, vyhledávání, odhalování trestné činnosti a stíhání trestných činů

6.5 V současnosti používané typy tělesných skenerů

Tělesné skenery se začaly nejdříve používat v USA, kde je otázka terorismu vnímána velmi intenzivně. Bezpečnost na letištích má v USA na starosti organizace Transportation Security Administration (TSA), která zatím schválila dva typy těchto tělesných skenerů. Všechna pravidla používání, které mají za úkol ochránit co nejvíce soukromí cestujících, tedy také vytvořila TSA.

TSA schválila dva typy pokročilých zobrazovacích technologií:

- Millimeter wave (milimetrové vlny)
- Backscatter (rentgenové záření)

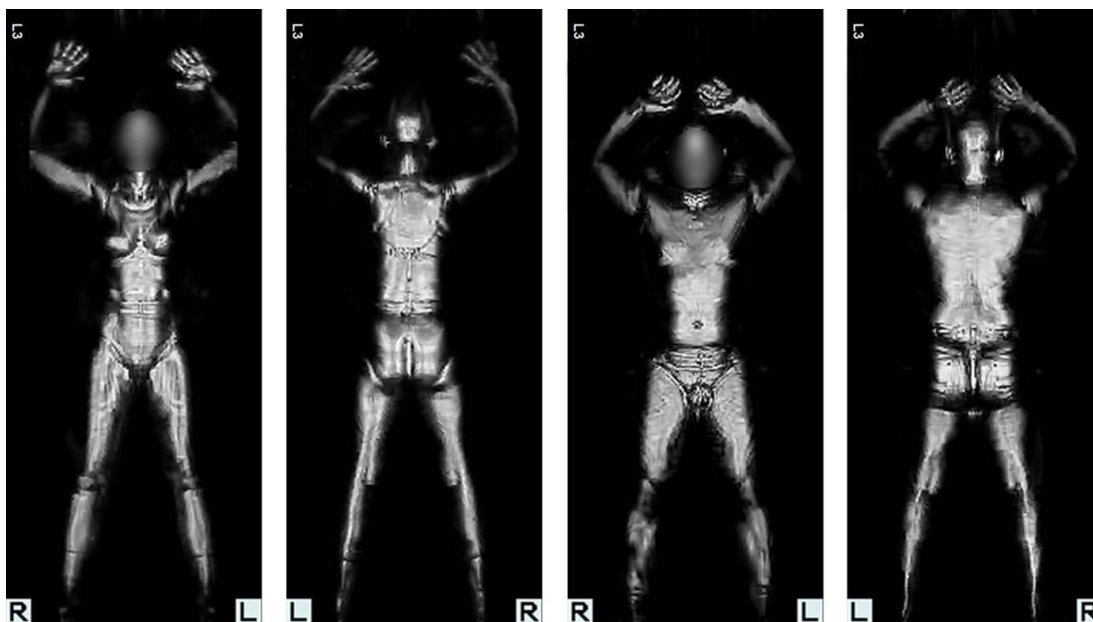
V současnosti (březen 2010) bylo využito 46 zobrazovacích jednotek na 22 letištích. Jednotky využívající technologii milimetrových vln se používají na 19 letištích. Na zbývajících třech letištích je umístěno pět jednotek s technologií „Backscatter“. V březnu 2010 začala TSA nasazovat 150 „Backscatter“ jednotek, celkem pak chce v tomto roce nasadit 450 takových jednotek, do roku 2014 pak 900. [29]

První otázkou, která se nabízí, je bezpečnost těchto pokročilých prověřovacích technologií. Výsledky měření TSA ale potvrdily, že dávky záření jsou hluboko pod limity stanovenými organizací ANSI (American National Standards Institute), a proto jsou bezpečné pro všechny cestující a technologie splňuje národní zdravotní a bezpečnostní předpisy.

6.5.1 Millimeter wave technology (MMW)

Tato technologie byla vyvinuta společností L-3 Communications, dostala název „ProVision“ a je založena na aktivním způsobu prověřování. Využívá bezpečných milimetrových vln, konkrétně se jedná o vlnovou délku $\lambda = 40\text{mm}$. Technologie prověřuje, zda u sebe kontrolované osoby nemají ukryté předměty – kovové i nekovové.

Společnost L-3 uvedla na trh již dvě verze technologie ProVision. U první verze je systémem vygenerován černobílý 3D snímek siluety osoby, který odhalí skryté objekty.



Obrázek 17: 3D snímek vygenerovaný technologií „Millimeter Wave“ [29]

Tento snímek je zobrazen na monitoru obsluhy ve vzdálené místnosti. Jestliže vyhodnocující obsluha na snímku zpozoruje možnou hrozbu, informuje o tom vysílačkou obsluhu terminálu. V tomto případě je uskutečněna fyzická prohlídka. V případě, že je na snímku vše v pořádku, je cestujícímu umožněno kontrolním stanoviště projít.

U první verze systému je kompletní vícerozměrný snímek dostupný do deseti sekund, přičemž samotné skenování trvá přibližně dvě sekundy. V závislosti na aplikaci je tedy možno prověřit 200 – 400 lidí za hodinu. U druhé verze terminálu klesla doba potřebná k prověření jednoho pasažéra na sedm sekund a průchodová kapacita terminálu tím stoupla na 450 cestujících za hodinu.

Druhá verze systému nazvaná ProVision ATD (Automatic Threat Detection) je schopna možné hrozby zjišťovat automaticky. ATD poskytuje tzv. image-free řešení, čímž vylučuje znepokojení týkající se ohrožení soukromí cestujících. Pokročilý software zpracovává snímaná data a sám bez zásahu člověka určuje, zda může pasažér projít kontrolním stanovištěm. Jestliže software zjistí potenciální hrozbu, zobrazí na displeji ovládacího panelu „obecnou figuru“, která se podobá lidskému obrysu, a zvýrazní na ní oblast, kde se daný předmět nachází. Bezpečnostní personál poté provede fyzickou prohlídku.



Obrázek 18: Terminál ProVision ATD s automatickým vyhodnocením hrozby a jejím označením na obecné figuríně [29]

ProVision i ProVision ATD nepoužívá žádné ionizující záření, ale pouze část radiofrekvenčního pásma, které využívá vlastností THz pásma. Signál vytvořený ProVision je 10 tis. krát slabší než u přenosu mobilního telefonu.

6.5.2 Backscatter

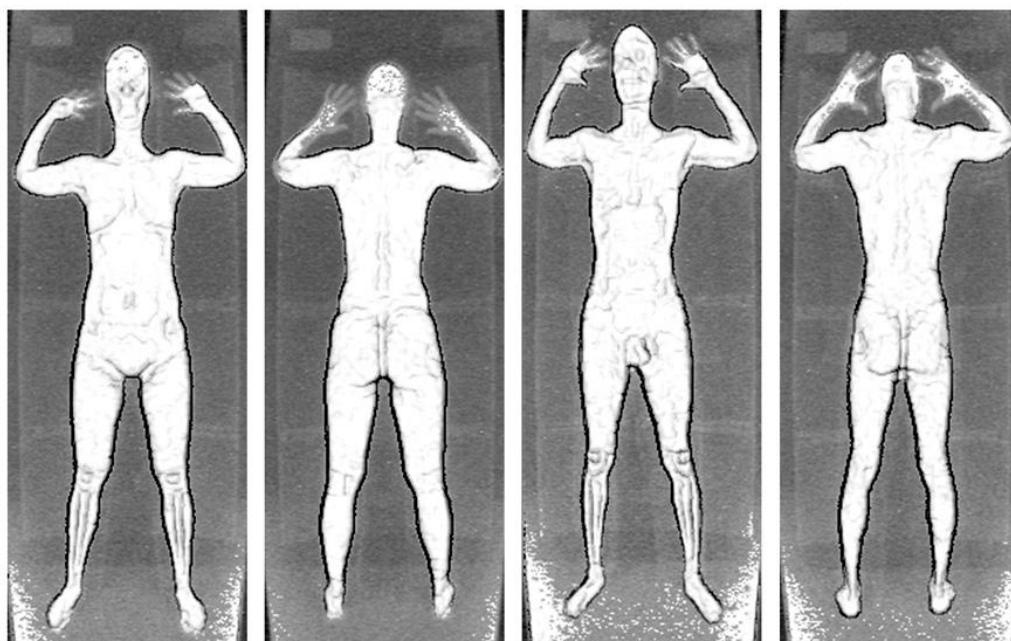
Technologie „Backscatter“ od společnosti Rapiscan Systems může u mnohých vzbudit mnohem větší pochybnosti než technologie předcházející. Systém Rapiscan Secure 1000 Single Pose totiž ke své funkci využívá nízkoenergetické rentgenové záření a jak je známo, rentgenové záření je ionizující a lidské tkáni škodí. Množství rentgenové energie vygenerované systémem Rapiscan Secure 1000 Single Pose je ale velmi malé:

- osoba by musela být kontrolována 1000 krát, aby přijala ekvivalentní množství záření jako u jednoho typického rentgenového vyšetření hrudi
- za jeden den na Zemi je člověk vystaven 60 krát většímu množství záření než při jedné kontrole pomocí Secure 1000 Single Pose
- dávka záření z jedné kontroly pomocí tohoto systému přibližně odpovídá dávce z kosmického záření za dvě minuty běžného komerčního letu



*Obrázek 19: Rapiscan Secure 1000 Single
Pose a typický postoj při skenování [29]*

Na dalším obrázku je vidět, jak vypadají výsledné snímky, které jsou zobrazeny na monitoru vzdálené vyhodnocující obsluhy.



Obrázek 20: Výsledný snímek vygenerovaný technologií Backscatter [29]

Rapiscan Secure 1000 je již druhou verzí systému využívající tuto technologii. U první verze bylo nutné, aby se cestující při snímání otočil o 180°. Systém jej totiž snímal pouze

z jedné strany. U druhé verze je tento nedostatek odstraněn a je dosaženo maximálního pohodlí pro cestující.

Porovnání s rentgenovým vyšetřením u lékaře

Při rentgenovém vyšetření potřebuje lékař získat velmi detailní obraz snímané oblasti s vysokým rozlišením detailů (často zlomky milimetru), na rozdíl od bezpečnostních skenerů, kde postačuje poměrně „hrubý“ snímek. Ke zhotovení jemného rentgenového snímku (tedy k získání většího množství informace) je zapotřebí použít větší množství záření, pro hrubý snímek bezpečnostního skeneru (= mnohokrát menší množství dat) postačuje mnohokrát menší množství záření.

Účinky malých dávek záření

Při jednom skenování je cestující vystaven 0,05 μSv , což je pětina dovolené dávky dle ANSI Standardu 43.17, který říká, že maximální dávka u jedné kontroly nemůže být větší než 0,25 μSv . Otázka škodlivosti velmi malých dávek ionizujícího záření je tématem mnoha studií, ale hledání odpovědi je velmi složité ze dvou základních důvodů:

- 1) Všechny živé organismy na Zemi jsou (a vždy byly) trvale vystaveny malým dávkám ionizujícího záření z přírodních pozadí (typická radiační zátěž z přírodního pozadí v ČR je 2-3 mSv/rok. Je tedy nemožné uskutečnit studii, ve které bude jedna skupina objektů ozařována velmi malou dávkou záření a druhá bude neozářená, a to proto, že malými dávkami jsme trvale ozařováni všichni.
- 2) Existují pouze dva možné závažné účinky malých dávek ionizujícího záření: indukce nádorů (projeví se u ozářeného organismu) a poškození pohlavních buněk (projeví se v další generaci vrozenou vadou). Oba tyto jevy (nádory, vrozené vady) se ale přirozeně vyskytují v lidské populaci. Účinek velmi malých dávek záření (méně než 1 mSv) je pak prakticky nemožné studovat, protože očekávané zvýšení výskytu těchto nežádoucích účinků při velmi malých dávkách záření je mnohem menší než náhodné fluktuace a časové změny přirozeného výskytu těchto jevů.

6.5.3 Legislativní aspekty u rentgenových zařízeních

I když je dávka záření u bezpečnostních skenerů velmi malá, jsou tyto skenery založeny na využití rentgenového záření a vztahuje se na ně proto příslušná legislativa (zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) ve znění pozdějších předpisů a vyhláška č. 307/2002 Sb. (vyhláška SÚJB o radiační

ochraně) ve znění pozdějších předpisů). Stejně jako u většiny jiných zdrojů ionizujícího záření musí být použití těchto skenerů v ČR schváleno Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB). SÚJB při svém rozhodování posoudí, zda jsou splněny základní principy radiační ochrany (tedy princip zdůvodnění, princip optimalizace a zásada dodržení limitu dávek), a to jak pro cestující, tak pro obsluhu přístroje. Na základě tohoto posouzení rozhodne SÚJB o udělení/neudělení povolení k používání zdroje záření. Při aplikaci principu zdůvodnění mohou být kromě fyzikálních a technických vlastností zdroje zváženy i jiné důležité faktory, například aspekty eticko-psychologické nebo možnost využití jiných metod k dosažení zamýšleného cíle. [30]

6.5.4 Stanovisko SÚJB k používání bezpečnostních rentgenů

Z hlediska radiační ochrany se jedná o expozici obyvatelstva ionizujícímu záření. Vzhledem k tomu, že není možné vyloučit negativní účinek záření na zdraví člověka ani u velmi malých dávek, je třeba, aby i takové záření podléhalo stanoveným pravidlům radiační ochrany. Navíc i proto, že se jedná o ozáření velké skupiny osob, všech věkových skupin a obou pohlaví (tedy i žen v reprodukčním věku a eventuelně těhotných). Již v roce 2008, kdy se objevil ze strany Evropské komise (EK) návrh na zařazení bezpečnostních skenerů osob od standardního vybavení evropských letišť, zaslal SÚJB své vyjádření k dané problematice s uvedením závěru, že pokud existuje alternativní metoda nevyužívající ionizující záření a poskytující srovnatelnou informaci použitelnou v rámci kontroly osob prováděné pro zvýšení bezpečnosti letecké dopravy, pak je nutno považovat použití rentgenového přístroje pro tyto účely za nezdůvodněné. [31]

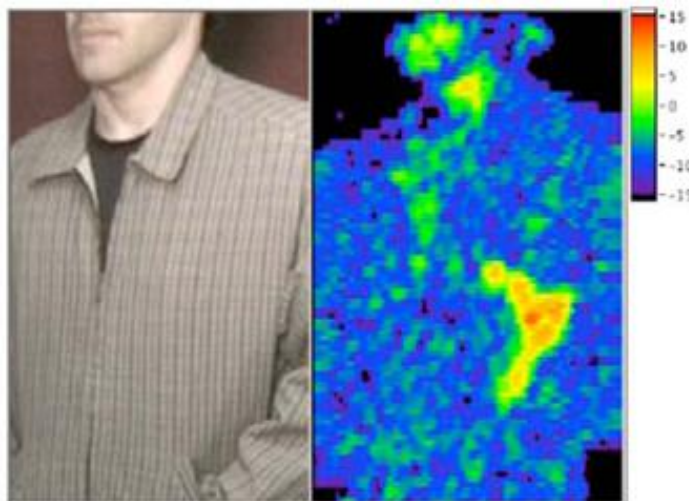
V současné době totiž existují alternativní systémy využívající aktivní ozáření kontrolované osoby vysokofrekvenčním zářením a následnou detekcí zpětně rozptýleného záření (např. ProVision). Další již používanou možností je pasivní detekce záření vyzařovaného lidským tělem (např. Rapiscan WaveScan 200). A v blízké budoucnosti bude vyvinut komplexní THz systém ve formě terminálu, který bude pro bezpečnostní skenování naprosto ideální.

7 THZ ZOBRAZOVACÍ SYSTÉMY

7.1 1,56THz zobrazovací systém

V následující kapitole bude popsán systém vyvinutý v Submillimeter-Wave Technology Laboratory na University of Massachusetts Lowell. Cílem projektu bylo vytvořit THz zobrazovací systém určený k identifikaci objektů skrytých pod oblečením na vzdálenost 2,5 m, se scénou o velikosti 0,5 x 0,5 m a rychlostí 2 snímky za sekundu. Základem systému byl laserový paprsek o frekvenci 1,56 THz, tento paprsek byl pak na předmět zaměřen pomocí nehybného zaostřujícího zrcadla o průměru 50 cm.

Řada dříve představených THz systémů vyžadovala pro tvorbu použitelného snímku dlouhou dobu, kterou nelze v praktickém využití akceptovat. V tomto projektu bylo cílem vytvořit praktický systém, jehož snímací doba se blíží obnovovacímu kmitočtu videa. Jako zdroj byl použit opticky čerpaný daleký infračervený laser. Přijímač byl složen ze Schottkyho diod pracujících při pokojové teplotě. Laser i diody byly optimalizovány pro použití při 1,56 THz. Elektronika byla navržena tak, aby poskytovala heterodynovou detekci. Rastrování bylo vytvořeno pomocí komerčně dostupného skenovacího zrcadla. Výsledný THz snímek je na obrázku.

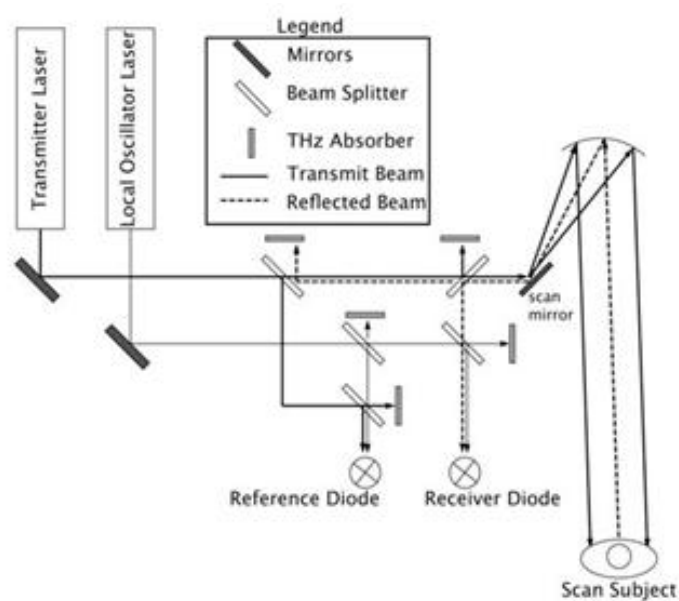


Obrázek 21: THz snímek [32]

Předchozí snímek byl vytvořen za 0,5 s a jedná se o jeden snímek z mnohem většího datového filmu. Rychlost pořizování dat nebyla omezena citlivostí přijímače, ale spíše mechanismem snímacího zařízení. Frekvence 1,56 THz byla vybrána, protože je situovaná v jednom z oken, kdy je absorpce v atmosféře molekulami vody při přenosu minimální.

Dále je tento kmitočet relativně vysoký (vlnová délka je naopak malá), a proto tento kmitočet může poskytovat dobré rozlišení.

Zdroj se sestává ze dvou ultra stabilních laditelných CO₂ laserů, jež jsou použity jako optická čerpadla pro dva vzdálené infračervené lasery. CO₂ lasery jsou nastaveny na produkování vlnové délky 9 μm, resp. 10 μm. Jejich výstupní výkon je poté použit k pumpování plynových laserů, a to difluorometan (CH₂F₂) s výstupním kmitočtem 1,5626 THz, resp. methanol (CH₃OH) s kmitočtem 1,5645 THz. Jeden laser je používán jako vysílač, zatímco druhý slouží jako přijímací lokální oscilátor.

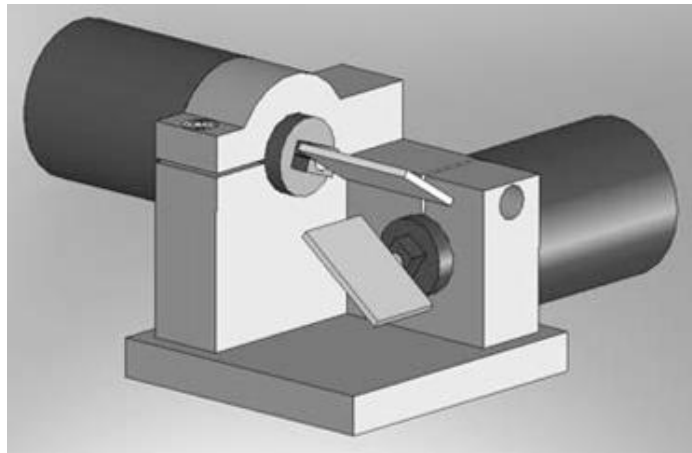


Obrázek 22: Návrh optiky [32]

Local oscillator laser (LO) se chová jako zdroj napájení, který produkuje optimální předpětí na referenční a přijímací diodě. LO signál prochází skrz sérii zařízení na rozklad svazku (beam splitter) tak, aby ozářil obě diody současně. Vysílací laser také prochází skrz sérii zařízení na rozklad svazku a malé množství přenášené energie je kombinováno s LO signálem na referenční diodě. Zbývající přenášená energie je řízena (směřována) pomocí zařízení na rozklad svazku a skenovacího zrcadla tak, aby bylo možno rastrovat předmět.

Ke skenování předmětu je nutné, aby byl laser zaměřen na co nejmenší bod na předmětu. Zaostřování je dosaženo odražením vysílacího laseru od zaostřujícího zrcadla o velkém průměru. Zaostřující zrcadlo má obrobený povrchu, průměr 0,51 m a ohniskovou vzdálenost 1,12 m. Vzhledem k tomu, že jsou použity relativně nízké kmitočty (ve srovnání s optickými kmitočty), musí být brán v úvahu efekt difrakce.

Signály přijaté na referenční a přijímací Schottkyho diodě jsou zpracovány (down-converted) a po sérii úprav je signál přeměněn na informaci o amplitudě a fázi.

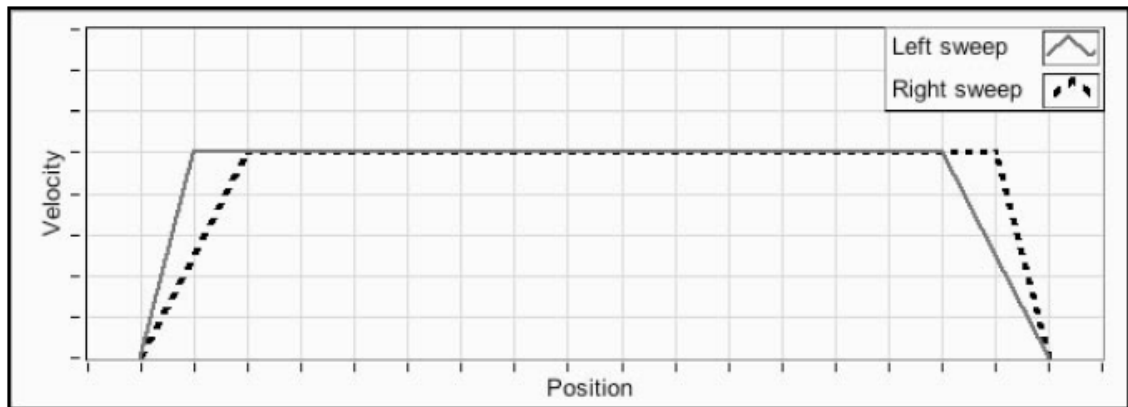


Obrázek 23: Skenovací zrcadlo [32]

Paprsek je nutno rastrovat napříč snímanou oblastí a právě k tomuto účelu bylo použito tzv. skenovací zrcadlo, které je ukázáno na obrázku. Jak je vidět z obrázku, toto skenovací zrcadlo se ve skutečnosti skládá ze dvou opticky kvalitních zrcadel, jež jsou namontovány na galvanometrických motorech, které jsou k sobě nastaveny ortogonálně (kolmo). Nižší zrcadlo je používáno jako rychlá snímací osa a rychle skenuje horizontální směr. Horní zrcadlo slouží pro pomalou snímací osu, což znamená, že skenuje vertikální směr. Svislý směr je snímán rychlostí 2 Hz, zatímco vodorovný směr má snímací rychlost 200 Hz. Z předchozího plyne, že tímto způsobem je možno produkovat 2 snímky na sekundu.

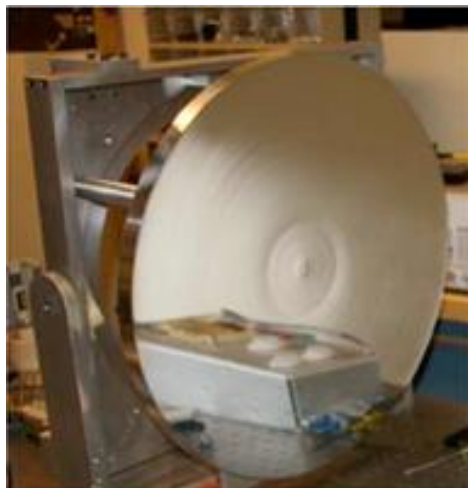
Obnovovací kmitočet je ve skutečnosti závislý hlavně na fyzikálních limitech rychlého skenovacího zrcadla. Pro sběr dat byl navržen speciální obvod, který ovládá snímací motory a poskytuje spouštěcí pulsy.

THz snímky se typicky skládají z 200x100 bodové mřížky vyžadující 20 000 komplexních datových bodů, z čehož plyne datová rychlost 40 kHz, jestliže požadujeme 2 snímky za sekundu. Komplexní informace o amplitudě a fázi je převedena na napětí pomocí synchronního zesilovače. Snímací oblast může mít maximální efektivní rozměr 0,51 x 0,51 m. Jenže potřeba velké rychlosti oscilace na rychlé snímací ose způsobovala produkci nadměrného tepla v motorech, což nakonec způsobovalo problémy s přesností měření pole. Galvanometr navíc musí zrychlit a zpomalit na koncích každého horizontálního snímání, a proto bylo možné pozorovat deformace při okrajích snímku. Rychlost skenovacího zrcadla je demonstrována na dalším obrázku, a protože je snímání dvousměrné, je rychlost z obou stran nesoúměrná.



Obrázek 24: Průběh rychlosti skenování rychlé skenovací osy [32]

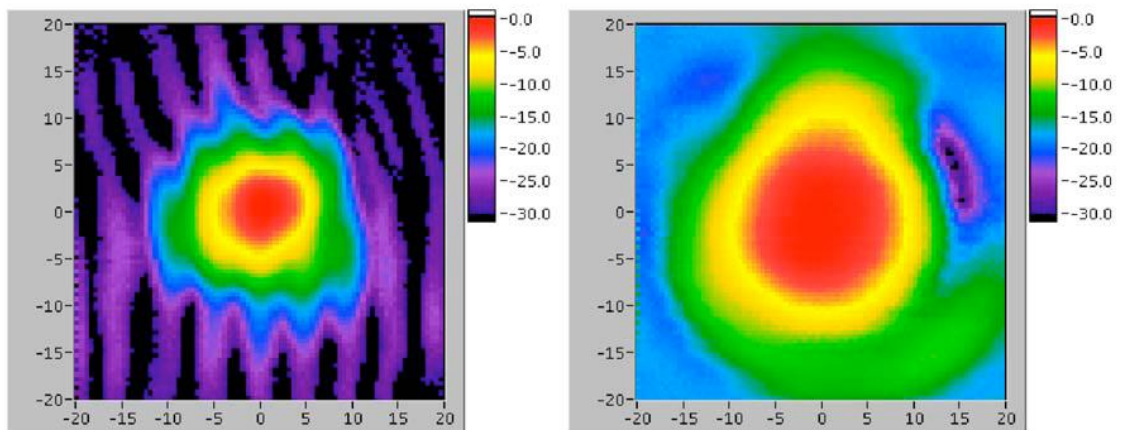
Bylo ale zjištěno, že deformace se stále opakovaly dostatečně přesně na to, aby bylo možno použít obrazové korekční algoritmy.



Obrázek 25: Zaostrovací zrcadlo [32]

Jako zaostrovací zrcadlo mělo být použito zrcadlo z aluminiové desky obrobenej na CNC soustruhu tak, že čelní plocha má požadované poloměry křivosti pro ohniskovou vzdálenost 1,12 m. Jenže právě tento článek systému se ukázal být nejslabším místem, které nám brání dosáhnout dobrých hodnot zaostření paprsku do co nejmenšího bodu na prověřované osobě. Omezení spočívá v deformacích způsobených obrobenými stopami.

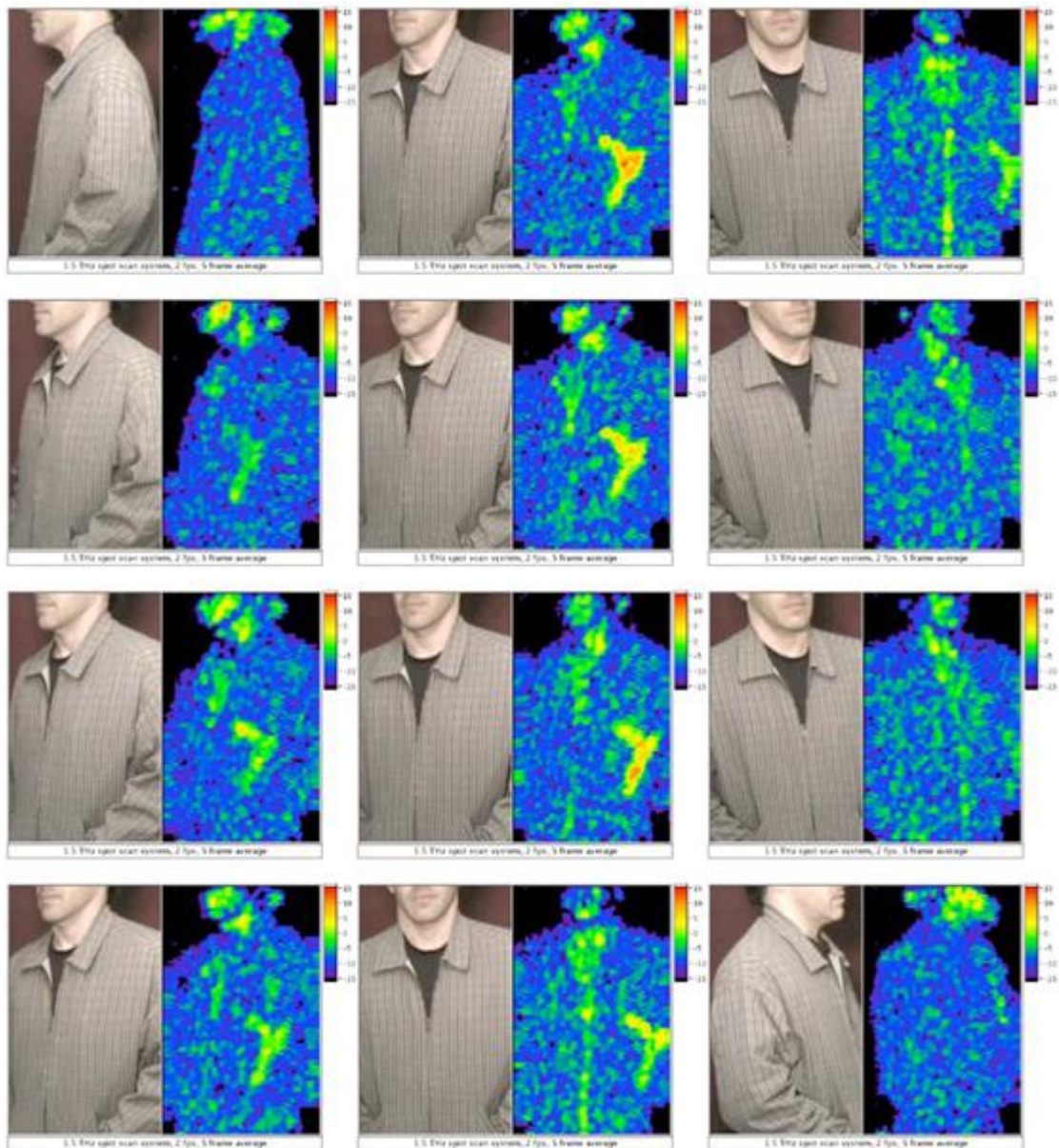
Jestliže ale tohle aluminiové zrcadlo nahradíme opticky kvalitním zrcadlem se stejnou ohniskovou vzdáleností, zjistíme na následujícím obrázku, že velikost soustředění bodu klesne téměř na polovinu.



Obrázek 26: Velikost zaostřeného bodu. Opticky kvalitní zrcadlo (vlevo), obrobené zrcadlo (vpravo) [32]

Plná šířka pulsu na úrovni poloviny maxima (The Full Width at Half Maximum - FWHM) soustředěného bodu byla po odrazu od opticky kvalitního zrcadla 7 mm, kdežto u obrobeného zrcadla to bylo 14 mm.

U následujících snímků byla omezena jejich velikost v horizontální ose, a to kvůli omezením způsobených rychlým skenovacím zrcadlem. Snímek má tedy velikost 0,33 x 0,51 m, což ale stačí k zobrazení trupu těla. Dobrovolník měl na sobě světlou bundu a pod ní ukrytou zbraň ve skryté kapse.

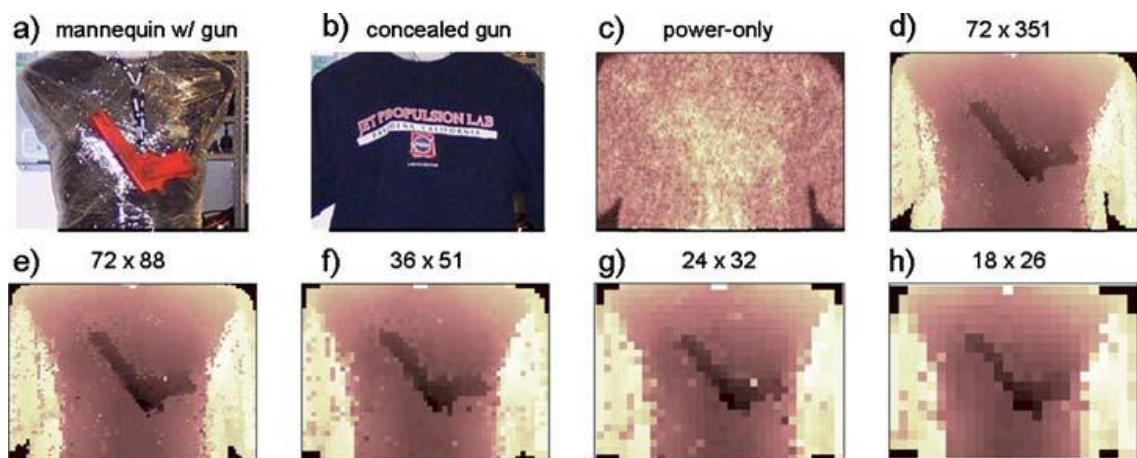


Obrázek 27: THz snímání rychlostí 2 snímky za sekundu [32]

7.2 660 – 690GHz zobrazovací radar

V této kapitole přiblížím další možný přístup k vytváření THz snímků. Tentokrát se jedná o využití širokopásmové radarové techniky s cílem vytvářet trojrozměrné snímky v časech kratších než jedna sekunda. U tohoto systému může být zobrazovací rychlost limitována třemi parametry, a to počtem pixelů, klidovou dobou pro jeden pixel a počtem paprsků projektovaných na cíl. Prvním úkolem je tedy určení nejmenšího možného množství pixelů a minimální možné klidové doby pro jeden pixel (z hlediska poměru signál/šum) tak, aby byla zachována spolehlivá detekce objektů ukrytých pod šaty.

Snímky na obrázku 28 byly získány použitím kmitočtově modulovaným spojitým (FMCW) radarovým systémem na frekvenci 660 – 690 GHz. Tento systém je založen na násobení frekvencí generovaných Schottkyho diodami. Průměrný výkon vytvořeného paprsku se pohybuje kolem hodnoty 0,2 mW a průměr tohoto paprsku je 0,5 cm. Snímek dané oblasti je vytvořen rychlým skenováním paprsku přes celou tuto cílovou oblast. Snímek 28c byl získán pouze detekcí výkonu a jak je vidět na tomto snímku, zbraň bychom zde odhalili pouze velice obtížně. U ostatních pořízených snímků již byl aplikován způsob zpracování signálu, který analyzuje i dobu letu paprsku, čímž lze ukrytou zbraň velice snadno odhalit.

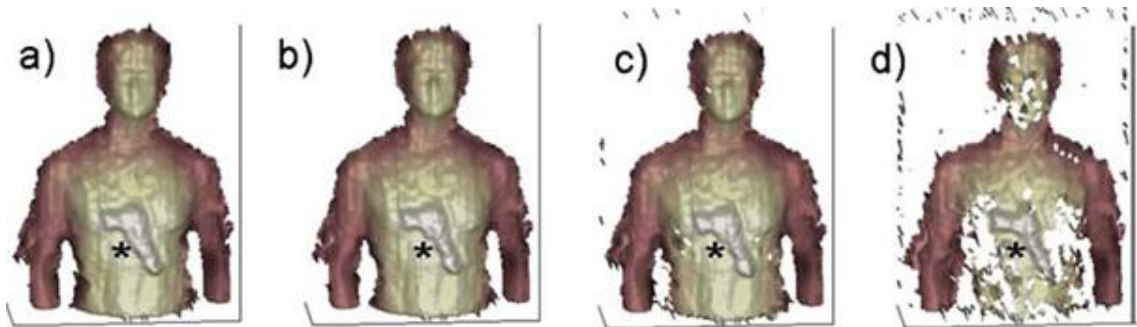


Obrázek 28: Efekt snižování rozlišovací schopnosti THz radarových snímků.

Vzdálenost figuríny je 4 m.

Minimální počet pixelů závisí na několika faktorech, jako je např. materiál a velikost detekovaných objektů, šířka radarového paprsku, požadované zorné pole a požadovaná obrazová kvalita. Pokud porovnáme získané snímky na předchozím obrázku, lze určit (s jistou mírou subjektivit), že dostatečné rozlišení snímku pro spolehlivou detekci ukryté zbraně je 36 x 51 pixelů. Celkově je tedy za požadovanou dobu nutno zobrazit 1836 pixelů.

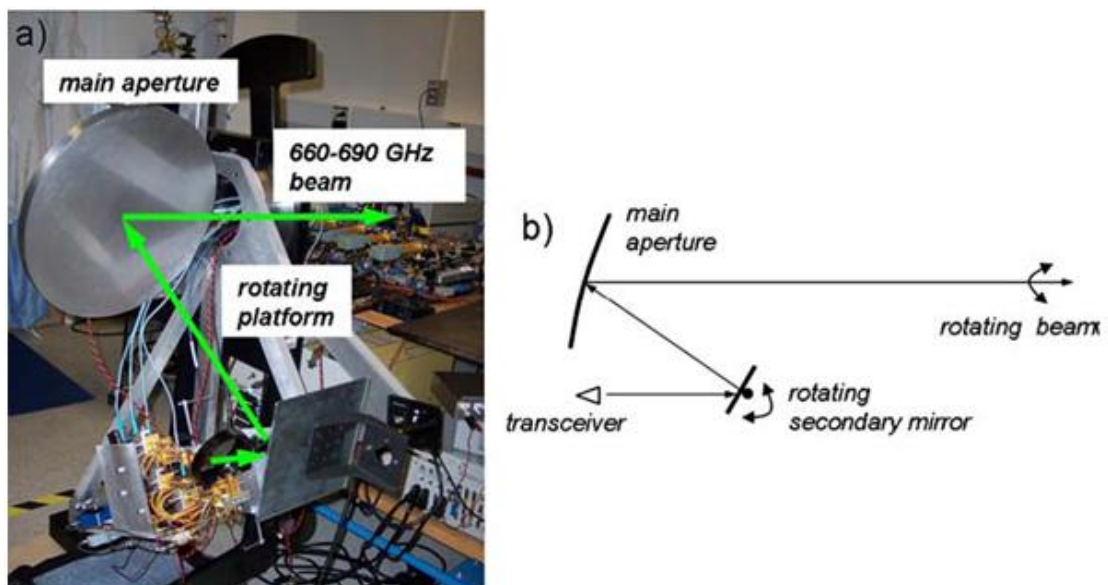
Při návrhu systému je tedy dále nutné určit prodlevu, která je potřebná pro pořízení jednoho pixelu. Při příliš krátké době prodlevy mezi jednotlivými pixely by mohlo hrozit ohrožení kvality snímku vlivem šumu. U pořizování představených snímků byla doba prodlevy stanovena na 12,5 ms. Při daném minimálním počtu pixelů (1836) byl tedy snímek pořizován téměř 23 sekund. Pro simulaci nižšího rozestupu signálu a šumu byl číslicově vygenerován bílý šum. Při této simulaci byly generované hladiny šumu na hodnotách 25 dB, 35 dB a 45 dB.



Obrázek 29: Simulace snímků s uměle zvýšenou hladinou šumu o 25, 35 a 45 dB

Na snímku 30c, kde je hladina šumu zvýšena o 35 dB se projevují pouze drobné nedostatky, což znamená, že THz zobrazovací radary mohou tolerovat snížení hodnoty signál/šum o 35 dB bez významnějšího snížení schopnosti detekovat ukrytou zbraň. Tato skutečnost dovoluje snížení minimální klidové doby pro jeden pixel o více než tři řády, v konkrétních číslech to znamená snížení prodlevy z 12,5 ms na téměř 5 μ s. Výstupní výkon a šum na přijímači by tedy neměly být limitujícími faktory v rychlosti THz zobrazovacího radaru. Při použití správných obvodů, které detekované záření zpracovávají, není limitujícím faktorem ani tato rychlost zpracování signálu.

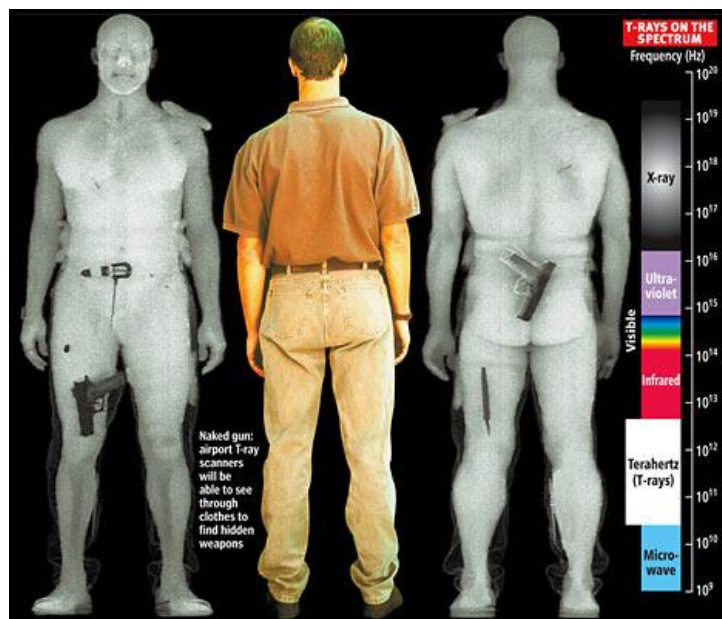
Stejně jako v předchozím prototypu zobrazovacího systému je hlavním limitujícím faktorem pro dosažení dostatečné rychlosti zobrazování mechanická část systému, která rastruje paprsek přes celou snímanou scénu.



Obrázek 30: Zobrazovací 660-690GHz radar s vyznačenou cestou paprsku

7.3 Budoucnost THz zobrazování

Z všeobecně dostupných informačních zdrojů byly zjištěny dva následující obrázky, na kterých jsou snímky pořízené THz zářením. S nadsázkou lze vyslovit hypotézu, že se jedná hlavně o uměle vytvořené snímky za účelem zviditelnění terahertzové technologie, jak by mohla být technologicky na velmi vysoké úrovni. V budoucnu, kdy se v THz technologiích opět pokročí dále, by ale mohly výsledné THz snímky vypadat právě takto.



Obrázek 31: Budoucnost THz zobrazování [34]



Obrázek 32: Budoucnost THz zobrazování [35]

ZÁVĚR

Závěrem lze zhodnotit výše získané informace jako možný soubor výhod a nevýhod mapování problematiky terahertzového vlnění, které je již v současné době zaváděno do praktického života do různých oblastí specifického využití jako např. zvýšení bezpečnosti života kolem nás. Druhý pohled je nutný zmínit zejména z hlediska následujícího výzkumu a jeho dopadu na již realizované projekty. Během výzkumu byl zjištěn problém s rezonančními efekty THz vlnění, které mohou způsobovat poškození nebo jiné narušení živých tkání. Tyto negativní účinky jsou ale nejspíše spojeny s velmi dlouhou dobou expozice, vysokým výkonem a navíc se vyskytují pouze u specifických frekvencí. Co se týče aplikací v bezpečnostní technologii, je dlouhá doba expozice vyloučena, protože samotná bezpečnostní prohlídka musí být co nejkratší (pouze několik sekund) z důvodu velkého pohybu lidí. Je ale velmi důležité si uvědomit, že pokud by se s odstupem času zjistil významný vliv na lidské zdraví vlivem dlouhodobějšího působení či jiným, v současné době, nezaznamenaným faktorem THz vlnění, tak by mohly být stávající ale i budoucí aplikace značně ovlivněny.

V práci byla také rozebrána problematika ochrany soukromí osob, jelikož existuje riziko zneužití vygenerovaných „nahých“ snímků. Pro eliminaci těchto rizik byla uvedena řada opatření, která by měla být dostatečná. S pokračujícím vývojem THz technologií může v budoucnu problematika zneužití snímků ale zcela odpadnout, protože daný systém bude schopen skrytou hrozbu rozpoznat zcela automaticky a žádné snímky proto generovat nebude.

Co se týče samotného přístupu k vytvoření kompaktního zobrazovacího systému, bylo uvedeno několik možností, z nichž každá je v současné době stále více a více zdokonalována. Vítězem tohoto pomyslného souboje bude ta technologie, která bude schopná prověřit osobu dostatečně přesně, rychle, bude mít odpovídající rozměry, přijatelnou pracovní teplotu a v neposlední řadě také cenu. Je zřejmé, že drtivá většina konečných aplikací nebo výzkumů bude v oblasti bezpečnostních technologií, lékařství a komunikace. Nelze než jen souhlasit s názorem, že využití submilimetrových a milimetrových vln za jistých kontrolovatelných podmínek (myšlena zejména eliminace vlivu záření na DNA) je pro následující generace dalším krokem k poznání světa kolem nás a tím i nás samotných.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Finally, we can assess the information obtained as a possible set of advantages and disadvantages of problems terahertz waves, which are currently introduced into the practical life in various areas of specific use, such as increasing the safety of life around us. The second view is important because of possible impact on already completed projects. During the research issue was identified with resonant THz wave effects, which may cause damage or disruption of living tissues. These negative effects but are probably associated with very long exposure time, high performance and also occurs only at specific frequencies. In security technology is a long exposure time excluded because the safety inspection must be as short as possible (only a few seconds) because of the large movement of people. But it is very important to realize that if they later found a significant impact on human health due to longer-term action or otherwise unfixed factor THz waves, existing and future applications could be significantly affected.

In work was also analyzed the problem of protecting people's privacy because there is a risk of abuse generated "naked" pictures. To eliminate these risks number of measures was introduced. Issues of abuse images may completely fall off with the continued development of THz technology, because the system will be able to detect concealed threat completely automatically and therefore no images will be generated.

Regarding the actual approach to the construct of a compact imaging system, it was presented several options, each of which is currently more and more refined. Winner of this contest will be the technology that is able to scan a person sufficiently accurately, quickly, will have the appropriate dimensions, an acceptable working temperature as well as price. It is clear that the vast majority of end-user applications will be in the field of security technology, medical and communications. Unable than just agree, with the view that the use of submillimeter and millimeter wave is the next generation to the next step to understanding the world around us and thus ourselves.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MEDRANO, Carolina. Monitoring Terahertz Technology. *ARAMIS* [online]. 31.05.2008, No. 1, [cit. 2010-04-16]. Dostupný z WWW: <www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=822>.
- [2] *Electro-Optical Industries, Inc.* [online]. c2008 [cit. 2010-04-16]. Electromagnetic Spectrum. Dostupné z WWW: <http://www.electro-optical.com/eoi_page.asp?h=The%20Electromagnetic%20Spectrum>.
- [3] VRBA, Jan. *Úvod do mikrovlnné techniky*. první. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. 236 s. ISBN 80-01-02112-2.
- [4] NEBESÁŘOVÁ, Jana. Mikrovlny v přípravě preparátů pro TEM. *Elektronová mikroskopie pro biology* [online]. 2001, 1, [cit. 2010-02-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/5.2.html>>.
- [5] TUREČEK, Jaroslav. *Možnosti využití terahertzového záření v oblasti bezpečnostních technologií*. In *Bezpečnostní technologie Systémy Management*. Zlín : Fakulta aplikované informatiky, 2009.
- [6] *THz Bridge Spectral Database* [online]. 2004 [cit. 2010-04-06]. THz Bridge. Dostupné z WWW: <<http://www.frascati.enea.it/thz-bridge/database/spectra/searchdb.htm>>.
- [7] SAKAMOTO, Seiichi; ISHIGURO, Masato; KAWABE, Ryohei. *National Astronomical Observatory of Japan* [online]. June 1998 [cit. 2010-04-16]. The Large Millimeter and Submillimeter Array. Dostupné z WWW: <<http://www.nro.nao.ac.jp/alma/E/lmsa-memo/2000-003.html>>.
- [8] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. Praha : BEN, 2007. Úvod, s. 10-22. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [9] http://web.njit.edu/~barat/em_spectrum.jpg
- [10] Project summary. *THz Bridge* [online]. 2004, [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.frascati.enea.it/THz-BRIDGE/reports/Project%20Summary_final.pdf>.
- [11] ALEXANDROV, B. S., et al. DNA Breathing Dynamics in the Presence of a Terahertz Field. *Los Alamos National Laboratory : Theoretical Division and*

- Center for Nonlinear Studies* [online]. 28.10.2009, 1, [cit. 2010-03-14]. Dostupný z WWW: <http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0910/0910.5294v1.pdf>.
- [12] *BrightSurf: The resources for science information* [online]. June 12, 2003 [cit. 2010-04-19]. Researchers use T-rays to uncover defects in space shuttle foam sample. Dostupné z WWW: <http://www.brightsurf.com/news/june_03/EDU_news_061203_c.html>.
- [13] Zdroj: KUŽEL, Petr; KADLEC, Filip; NĚMEC, Hynek Úvod do terahertzové technologie . In *Radiokomunikace 2009*. Pardubice : UNIT s.r.o., listopad 2009. s. 171-178.
- [14] POSPIECH, Matthias . *Terahertz Technology : an Overview*. TU Kaiserslautern, 2003. 12 s. Oborová práce. University of Sheffield.
- [15] *TeraNova* [online]. 2009 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.teranova-ist.org/>>.
- [16] DENOS, Sharlene. *Terahertz Time Domain Spectroscopy*. [online]. 2005, [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://online.physics.uiuc.edu/courses/phys598OS/fall05/FinalPapers-05/Sharlene.pdf>>.
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/Photo-dember>
- [18] HULICIUS, Eduard. Optoelektronika : polovodičové zdroje záření. *Fyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. 2006 [cit. 2009-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/7.pdf>>.
- [19] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [20] WILLIAMS, Benjamin. Terahertz quantum-cascade lasers. *Nature* [online]. September 2007, Vol 1, [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <www.mtinstruments.com/THz%20Quantum%20Cascade%20Lasers.pdf>.
- [21] FERGUSON, Bradley; ZHANG, Xi-Cheng. Materials for terahertz science and technology. *Nature materials* [online]. 2002, 1, [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.eleceng.adelaide.edu.au/thz/publications/ferguson_2002_npg.pdf>.
- [22] MEDRANO, Carolina. Monitoring Terahertz Technology. *ARAMIS* [online]. 30.08.2008, No. 2, [cit. 2010-04-16]. Dostupný z WWW: <www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=823>.

- [23] BOYD, Jade. *Rice* [online]. 10/12/2006 [cit. 2010-04-14]. A pixel's worth 1,000 words. Dostupné z WWW: <<http://www.media.rice.edu/media/NewsBot.asp?MODE=VIEW&ID=8912>>.
- [24] WILLIAMS, Mike. *Rice* [online]. 10/9/2008 [cit. 2010-04-14]. Single-pixel has multiple futures. Dostupné z WWW: <<http://www.media.rice.edu/media/NewsBot.asp?MODE=VIEW&ID=11583>>.
- [25] *Laboratoř terahertzové spektroskopie* [online]. 26. 1. 2010 [cit. 2010-04-01]. Výzkum – terahertzová spektroskopie. Dostupné z WWW: <<http://department.fzu.cz/lts/cz/res-thz.htm>>.
- [26] HU, Qing. Real-time THz Imaging Using Quantum-cascade Lasers and Focal-plane Array Cameras. In *2nd International Workshop on Quantum Cascade Lasers*. Brindisi, Italy : Massachusetts Institute of Technology, 2006 [cit. 2010-04-13]. Dostupné z WWW: <www.rle.mit.edu/2006qcl/documents/Hu_000.pdf>.
- [27] *Rapiscan systems* [online]. 2010 [cit. 2010-04-19]. People screening. Dostupné z WWW: <<http://www.rapiscansystems.com/peoplescreening.html>>.
- [28] Česko. *Zákon č. 101/2000 Sb., o ochraně osobních údajů* . In Sbíрка zákonů, Česká republika. 2000, Dostupný také z WWW: <<http://business.center.cz/business/pravo/zakony/ouu/>>.
- [29] *Transportation Security Administration* [online]. 2010 [cit. 2010-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.tsa.gov/>>.
- [30] JUDAS, Libor. Bezpečnostní rentgeny na letištích . *Zdravotnické noviny* [online]. 01.02.2010, 2/2010, [cit. 2010-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.zdravky.cz/zpravodajstvi/zdravotnicke-noviny-plus/bezpecnostni-rentgeny-na-letistich>>.
- [31] Používání bezpečnostních rentgenů pro kontrolu osob : Stanovisko SÚJB k instalaci a používání "bezpečnostních rentgenů" pro účely kontroly osob. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2009, [cit. 2010-03-30]. Dostupný z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=937>.
- [32] GOYETTE, Thomas, et al. *1.56 Terahertz 2-frames per second standoff imaging*. OPTO [online]. January 2008, Vol. 6893, [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://stl.uml.edu/PubLib/DickinsonDSS2006.pdf>>.

- [33] COOPER, K.B., et al. An Approach for Sub-Second Imaging of Concealed Objects Using Terahertz (THz) Radar. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* [online]. Volume 30, Number 12 / December, 2009, [cit. 2010-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/d518601wu241526u/>>. ISSN 1866-6892(Print)1866-6906(Online).
- [34] The amazing strip-search scanner. *Daily Mail* [online]. 2007, [cit. 2010-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-455506/The-amazing-strip-search-scanner.html>>.
- [35] EU-Kommission will "Nackt-Scanner" vorerst nicht zulassen. *Heise online* [online]. 21. 11. 2008, [cit. 2010-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.heise.de/newsticker/meldung/EU-Kommission-will-Nackt-Scanner-vorerst-nicht-zulassen-217689.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM
f	Hz	frekvence (kmitočet)
E	J	energie
E	eV	energie
λ	m	vlnová délka
c	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu
h	$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$	Planckova konstanta
-	Sv	dávkový ekvivalent ionizujícího záření
-	W	výkon

AM Amplitudová modulace

FM Frekvenční modulace

TDS Time-Domain Spectroscopy (spektroskopie v časové oblasti)

QCL Quantum Cascade Laser (kvantový kaskádový laser)

CW Continuous wave (spojitá vlna)

CPA Chirped pulse amplification (metoda zesilování ultrakrátkých laserových pulsů)

DMD Digital Micromirror Device (digitální zařízení s mikrozrcadly)

TSA Transportation Security Administration

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

ANSI American National Standards Institute

FEL Free - electron laser

MMW Millimeter Wave Technology

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: THz mezera v elektromagnetickém spektru [1]</i>	12
<i>Obrázek 2: Elektromagnetické spektrum [2]</i>	13
<i>Obrázek 3: Absorpce atmosféry [6]</i>	20
<i>Obrázek 4: Absorpce atmosféry v rozsahu od 150 GHz do 1,6 THz [7]</i>	20
<i>Obrázek 5: Energie fotonu [9]</i>	22
<i>Obrázek 6: Anténní struktura. Kontaktní plošky a anténa jsou z křemíku. [1]</i>	29
<i>Obrázek 7: Optické usměrňování v nelineárním optickém krystalu [1]</i>	30
<i>Obrázek 8: Photo-Dember efekt [17]</i>	31
<i>Obrázek 9: Princip laseru [19]</i>	32
<i>Obrázek 10: Struktura kvantového kaskádového laseru [21]</i>	34
<i>Obrázek 11: Schéma jednopixelové kamery [24]</i>	36
<i>Obrázek 12: Schematické uspořádání při THz TDS [21]</i>	39
<i>Obrázek 13: Puls získaný THz TDS (vlevo), frekvenční spektrum získané Fourierovou transformací (vpravo) [25]</i>	40
<i>Obrázek 14: Terahertzové spektrální otisky některých druhů výbušnin [26]</i>	40
<i>Obrázek 15: Rapiscan WaveScan 200 [27]</i>	42
<i>Obrázek 16: Snímky získané pasivní detekcí milimetrových vln [27]</i>	42
<i>Obrázek 17: 3D snímek vygenerovaný technologií „Millimeter Wave“ [29]</i>	47
<i>Obrázek 18: Terminál ProVision ATD s automatickým vyhodnocením hrozby a jejím označením na obecné figuríně [29]</i>	48
<i>Obrázek 19: Rapiscan Secure 1000 Single Pose a typický postoj při skenování [29]</i>	49
<i>Obrázek 20: Výsledný snímek vygenerovaný technologií Backscatter [29]</i>	49
<i>Obrázek 21: THz snímek [32]</i>	52
<i>Obrázek 22: Návrh optiky [32]</i>	53
<i>Obrázek 23: Skenovací zrcadlo [32]</i>	54
<i>Obrázek 24: Průběh rychlosti skenování rychlé skenovací osy [32]</i>	55
<i>Obrázek 25: Zaostrovací zrcadlo [32]</i>	55
<i>Obrázek 26: Velikost zaostrěného bodu. Opticky kvalitní zrcadlo (vlevo), obrobené zrcadlo (vpravo) [32]</i>	56
<i>Obrázek 27: THz snímání rychlostí 2 snímky za sekundu [32]</i>	57
<i>Obrázek 28: Efekt snižování rozlišovací schopnosti THz radarových snímků. Vzdálenost figuríny je 4 m.</i>	58

<i>Obrázek 29: Simulace snímků s uměle zvýšenou hladinou šumu o 25, 35 a 45 dB</i>	59
<i>Obrázek 30: Zobrazovací 660-690GHz radar s vyznačenou cestou paprsku</i>	59
<i>Obrázek 31: Budoucnost THz zobrazování [34]</i>	60
<i>Obrázek 32: Budoucnost THz zobrazování [35]</i>	60

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Označení kmitočtových pásem dle IEEE [3]</i>	13
<i>Tabulka 2: Energie fotonů THz frekvenčního pásma</i>	21