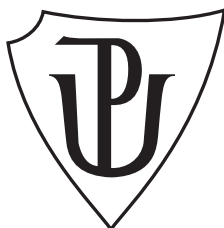


UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Určení dosahu laserových dálkoměrů
pro měření v exteriéru



Vypracoval: Bc. David Výkruta

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Optika a optoelektronika

Forma studia: Prezenční

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Řehoř, Ph. D.

Termín odevzdání práce: květen 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Řehoře, Ph. D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne 3. 5. 2024

.....

David Výkruta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Zdeňku Řehořovi, Ph. D., za trpělivost a odborné vedení a Mgr. Filipovi Chlupovi za odborné konzultace a rady.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Bc. David Výkruta
Název práce	Určení dosahu laserových dálkoměrů pro měření v exteriéru
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Katedra optiky
Vedoucí práce	Ing. Zdeněk Řehoř, Ph. D.
Rok obhajoby práce	2024
Abstract	Dosah dálkoměru je jeden z nejdůležitějších parametrů přístroje, ale neexistuje ustálený způsob jeho měření. Tato práce je věnována měření parametrů laserových dálkoměrů. Především dosahu na LTE měřicí stanici v laboratorních podmínkách a následnému porovnání výsledků s terénním měřením.
Klíčová slova	Laserový dálkoměr, LTE měřicí stanice, dosah dálkoměru, ND filtry
Počet stran	76
Počet příloh	2
Jazyk	český

Bibliographical identification

Author's first name and surname	Bc. David Výkruta
Title	Definition of laser rangefinders range for outdoor measurements
Type of thesis	Diploma
Department	Department of Optics
Supervisor	Ing. Zdeněk Řehoř, Ph. D.
The year of presentation	2024
Abstract	Rangefinder range is one of the most important parameters of the device, but does not exist established way of it's measuring. This thesis is about measuring parameters of laser rangefinders. Especially range of rangefinders on LTE testing station in laboratory conditions and comparing of results with field measurement.
Keywords	Laser rangefinder, LTE testing station, range, ND filters
Number of pages	76
Number of appendices	2
Language	czech

Obsah

Obsah	8
Úvod	9
1 Laserové dálkoměry	11
1.1 Rozbor impulzních laserových dálkoměrů	12
1.2 Faktory ovlivňující měření	15
1.3 Měřené přístroje	18
2 LTE měřící stanice	23
2.1 LE Control	25
2.2 Pulse Browser	27
2.3 MET Control	29
2.4 LF Control	30
3 Laboratorní měření dosahu	33
3.1 Měření PLRF25C na LTE	35
3.2 Měření PLRF25C v exteriéru	39
3.3 Měření Moskito TI+ na LTE	43
3.4 Měření JIM Compact na LTE	46
Závěr	51
A Laserová bezpečnost	53
B Výsledky měření dalších dálkoměrů	57
B.1 Měření simulovaných vzdáleností přístrojů PLRF25C s programem MET Control	57
B.2 Měření parametrů dálkoměrů PLRF25C v programu Pulse Browser	63
B.3 Měření simulovaných vzdáleností přístrojů Moskito TI+ s programem MET Control	69

B.4 Měření parametrů dálkoměrů Moskito TI+ v programu Pulse	
Browser	72
Literatura	75

Úvod

Tato práce je vytvořena ve spolupráci s firmou PRAMACOM-HT, spol. s r.o., která mi poskytla přístup k LTE měřicí stanici a několika typům laserových dálkoměrů se kterými jsem mohl pracovat. Cílem práce je porovnání laboratorních a terénních výsledků měření dosahu laserových dálkoměrů pro tři dálkoměry PLRF25C, MOSKITO TI+ a JIM Compact s využitím LTE měřicí stanice. Konkrétně se jedná o dálkoměry pro měření v exteriéru na vzdálenosti 0 až 30 km využívané ozbrojenými složkami.

Pokud chceme ověřit funkčnost laserového dálkoměru, zajímá nás, jak funguje vysílač a přijímač laserového signálu. O vysílači je možné zjistit mnoho parametrů přímým změřením laserového svazku jako například vlnovou délku, výkon, šířku pulzů, atd., ale funkčnost a kvalita přijímače se určuje obtížněji. Navíc přijímač je naprosto závislý na vysílači a celkové konstrukci, a je proto výhodné, pokud lze zhodnotit kvalitu všech částí současně.

Dosah lze měřit přímo v terénu, avšak tento způsob má několik nevýhod. Pokud vynecháme technické komplikace, jako např. potřeba několika cílů měření ve známé vzdálenosti, zásadním nedostatkem je špatná opakovatelnost měření. Během měření musí laserový paprsek projít přes určitou vrstvu atmosféry. Protože se však atmosféra neustále turbulentně mění, nemohou být zaručeny stejné podmínky pro byt' jen dvě po sobě jdoucí měření. S opakovatelností měření s odstupem delší doby (dny, týdny) je to ještě horší, protože může dojít ke změně teploty, vlhkosti a dalším atmosférickým jevům, které mohou ovlivnit index lomu vzduchu a útlum atmosféry. Proto je výhodný způsob, jak zachovat opakovatelnost měření, použití vhodného měřicího přístroje. Tím může být například LTE měřicí stanice. Navíc je měření kompaktní a lze provádět v laboratoři.

Práce je rozdělena na tři kapitoly a doplněna dvěma přílohami. V první kapitole jsou popsány základní principy fungování laserového dálkoměru a jsou popsány dálkoměry, se kterými se pracuje. Ve druhé kapitole je představena

LTE měřicí stanici. Je zde ukázáno, jak se s ní pracuje a jakých měření je schopna. Třetí kapitola je zaměřena na prezentaci výsledků z měření na LTE stanici. Z nich je vyvozen vhodný postup, jak zhodnotit funkčnost a kvalitu laserového dálkoměru v laboratorních podmínkách za využití LTE měřicí stanice. Dále je zde provedeno srovnání s měřením v exteriéru. V závěru jsou pak shrnuty a zhodnoceny výsledky, jakých lze s LTE stanicí dosáhnout. Také jsou zde rozebrány nedostatky a navrženy další postupy měření. Vzhledem k tomu, že výkon laserů, a tím i dosah laserových dálkoměrů, je omezen normou o neionizujícím záření je zde první příloha věnována klasifikaci laserů podle této normy a laserové bezpečnosti. Ve druhé příloze jsou pak výsledky měření, které nejsou přímo použity v hlavní části práce.

Kapitola 1

Laserové dálkoměry

Laserový dálkoměr je zařízení sloužící k určování vzdálenosti. Přístroj se skládá ze tří základních částí: vysílače, přijímače a pozorovací větve. Vysílač vyšle laserový signál, který se odrazí od cíle zpět a je zachycen přijímačem. Existuje několik způsobů, jak určit vzdálenost. Jednou z možností jsou impulzní dálkoměry, kde je vzdálenost d vypočtena jako (1.1),

$$d = \frac{t}{2} \cdot c \quad (1.1)$$

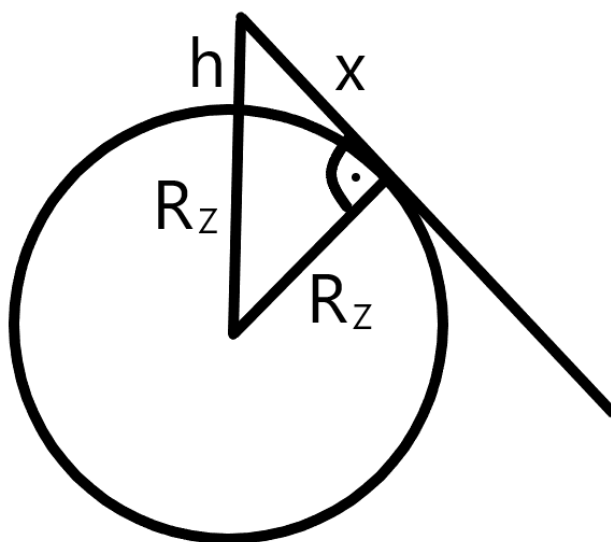
kde t je čas od vyslání signálu do jeho přijetí a c je rychlost světla ve vakuu.

V praxi se většinou místo vyslání jednoho pulzu (např. TLS40) využívá vyslání většího množství pulzů (řádově stovky až tisíce, dle typu přístroje) pro jedno měření. Všechny měřené přístroje, tj. Moskito TI+, PLRF25C a JIM Compact, spadají do kategorie vícepulzních laserových dálkoměrů. Jejich specifika budou rozebrány podrobněji dále v odpovídajících podkapitolách.

Jiným způsobem určení vzdálenosti je fázový dálkoměr, kde je intenzita vysílaného signálu sinusově modulována. Při odrazu od cíle dojde ke změně fáze, ze které je určena vzdálenost. Nevýhodou tohoto typu je nejednoznačnost výsledků pro vzdálenosti větší než vlnová délka modulace. Z tohoto důvodu se někdy používá kombinace impulzního a fázového dálkoměru. Další nevýhodou je nutná znalost odrazivých vlastností cíle. Fázové dálkoměry jsou vhodné především na měření kratších vzdáleností. Protože se tato práce zabývá především měření velkých vzdáleností a cílů jejichž odrazivé vlastnosti nejsou často známy, tak jsou dále rozebírány pouze impulzními dálkoměry.

1.1 Rozbor impulzních laserových dálkoměrů

Obecně se dají laserové dálkoměry dělit podle několika vlastností. V první řadě je lze rozdělit na impulzní a fázové, jak bylo zmíněno výše. Také je lze dělit podle využití na dálkoměry do interiéru (měření krátkých vzdáleností s větší přesností) a dálkoměry do exteriéru (měření velkých vzdáleností). Tato práce se bude zabývat výhradně impulzními dálkoměry do exteriérů. U nich je vedle přesnosti kladen velký důraz na dosah. Obecně platí, že čím větší dosah, tím lepší dálkoměr je. Avšak existuje mez cca 30 km, kterou je z praktického hlediska zbytečné překonat. Tato mez vychází ze zjednodušeného modelu Země, kdy uvažujeme Zemi jako kouli s poloměrem $R_Z = 6378\text{km}$ a na ní pozorovatele s dálkoměrem ve výšce $h = 100\text{m}$ nad okolním terénem. To může představovat například pozorovatele na kopci nebo budově. Z obrázku 1.1 je pak patrné, že maximální použitelný dosah je odvěsna x vyznačeného trojúhelníku, kterou vypočteme pomocí Pythagorovy věty za aproximace pro $h \ll R_Z$ (1.2). Cíle ve větší vzdálenosti by již měřit nešlo, protože by se nacházely za obzorem.



Obrázek 1.1: Zjednodušený model pro maximální použitelný dosah dálkoměru.

$$x^2 = (R_Z + h)^2 - R_Z^2 \quad (1.2)$$

$$x^2 = 2R_Z h + h^2 \quad (1.3)$$

$$x \approx \sqrt{2R_Z h} \quad (1.4)$$

Dále lze dálkoměry dělit na jednopulzní a vícepulzní, navíc se mohou lišit tím, jaký profil pulzu vysílají. Může jít o pravoúhlý pulz jehož výkon $P(t)$ je popsán funkcí (1.5)[1],

$$P(t) = \frac{E_0}{\tau} \cdot \mathbf{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.5)$$

kde $E_0 = \tau \cdot P(t)$ je celková energie pulzu a τ je jeho šířka. [1]

Pulz má stejnou hodnotu výkonu po celou dobu trvání a je normovaný tak, aby E_0 odpovídala celkové energii pulzu. Funkce \mathbf{rect} je definovaná jako (1.6) [1].

$$\mathbf{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1 & t \in \langle -\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2} \rangle \\ 0 & t \notin \langle -\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2} \rangle \end{cases} \quad (1.6)$$

Další možností je gaussovský pulz, který je definovaný (1.7),

$$P(t) = \frac{2E_0}{\tau\sqrt{\pi}} \exp\left\{-\frac{t^2}{(\tau/2)^2}\right\} \quad (1.7)$$

kde τ je délka pulzu. [1]

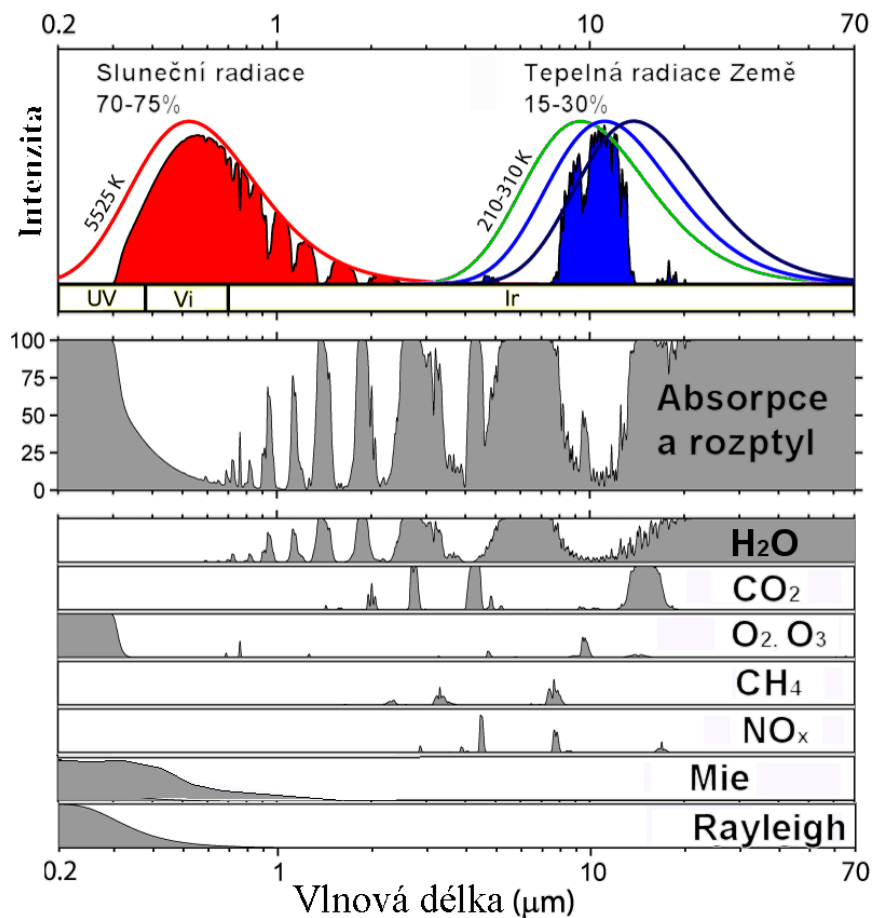
Posledním tvarem, který zde bude uveden, je parabolický pulz (1.8), přesněji řečeno jde o profil negativní paraboly vymezený pomocí pravoúhlé funkce (1.6) tak, aby výkon neklesnul do záporných hodnot [1].

$$P(t) = \frac{3E_0}{2\tau} \left(1 - \frac{4t^2}{\tau^2}\right) \mathbf{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.8)$$

Funkce je škálovaná tak, aby celková energie pulzu byla E_0 . Pro přesnější popis reálného tvaru pulzu se někdy používá kombinace parabolického profilu (1.8) v intervalu $\langle -\infty, 0 \rangle$ a gaussovského pulzu (1.7) v intervalu $\langle 0, \infty \rangle$.

Při rozboru pulzů je také důležité, s jakou vlnovou délkou dálkoměr pracuje. Obecně se používají vlnové délky z blízké infračervené oblasti (např.

1550 nm), protože jsou dobře propouštěny atmosférou, jak je vidět na obrázku 1.2. Dle norem [2] spadají tyto vlnové délky do kategorie, která nejméně omezuje výkon, díky čemuž lze dosáhnout lepšího dosahu. Navíc jsou tyto vlnové délky při dodržení zmíněných norem označeny jako oku bezpečné. U dálkoměrů pro vojenské účely má blízká infračervená oblast tu výhodu, že signál z dálkoměru není viditelný okem a díky tomu pozorovatel zůstává neodhalen během měření.



Obrázek 1.2: Okna propustnosti atmosféry. [15]

Dále lze dálkoměry dělit podle jejich konstrukce na koaxiální dálkoměry a dálkoměry s různými objektivy. U koaxiálních dálkoměrů mají dva z prvků dálkoměru (vysílač, přijímač, pozorovací větev) společný objektiv. Pokud jde o spřažení vysílače a přijímače, výhodou je minimální mrtvý úhel a možnost měření i malých vzdáleností. Nevýhodou je, že signál musí procházet přes dělicí hranol a na něm a čočce objektivu může docházet ke zpětným od-

razům, které mohou ovlivnit vyhodnocování vzdálenosti. Na druhou stranu u dálkoměrů s odděleným vysílačem a přijímačem vzniká mezi nimi mrtvý úhel, což vede k tomu, že velmi malé vzdálenosti nebude přístroj schopen měřit. S tím souvisí i potřeba sesouhlasení optických os jednotlivých prvků. Běžně se také používá spřažení s pozorovací větví. V tomto případě se většinou k pozorovací větví připojí přijímač, který tak může mít větší plochu a zvýší se tím pravděpodobnost detekce signálu.

Některé dálkoměry nabízejí více pozorovacích větví. Typicky se jedná o přímohlednou pozorovací větev, termovizní kameru a nízkojasovou kameru, ale může být použita i noktovizní větev s mikrokanálkovou destičkou. Tyto pozorovací větve pak také bývají různě spojovány. Další dělení podle konstrukce se týká pozorovací větve, kde se dálkoměry dělí na monokulární, bi-okulární a binokulární. Monokulární mají jeden objektiv (zde myšleno jeden objektiv konkrétní pozorovací větve) a jeden okulár. Bi-okulární má stále jeden objektiv, ale výstup je rozdělen do dvou okulárů a na závěr binokulární má dva okuláry i objektivy.

Nejistota měření daná samotným přístrojem je závislá na třech hlavních faktorech. Jsou to odstup signálu od šumu (SNR), šířka pulzu (τ) a vzorkovací frekvence generátoru hodinových impulzů (f_{smp}). Nejistotu měření pak lze vyjádřit jako 1.9 [3]

$$\sigma_s \sim \frac{c}{2} \left(\frac{1}{SNR} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{f_{smp}}} \right). \quad (1.9)$$

1.2 Faktory ovlivňující měření

Při měření laserovým dálkoměrem představuje důležitou „součást“ prostředí, jímž signál prochází. Prostředím je myšlena atmosféra, ale může jím být např. optické vlákno. Protože atmosféra není homogenní ani izotropní prostředí, světlo se zde nešíří přímočaře. Dochází k lokálním změnám indexu lomu se kterými souvisí teplotní gradienty a lokální změny tlaku. Velkou roli hraje také přítomnost vodních par v atmosféře. Ty zapříčiňují zvýšený útlum vlnových délek v blízké infračervené oblasti. [4] Měření také ovlivňuje přítomnost různých plynů nebo pevných částic v atmosféře a disperze. Všechny tyto jevy se rozdělují do dvou skupin. Jevy ovlivňující propustnost, převážně kvůli absorpci a rozptylu, označujeme jako turbiditu, která ovlivňuje výkon pulzu procházejícího atmosférou. Lze ji vyjádřit jako (1.10) [1],

$$P(L) = P_0 \cdot t_{atm} \quad (1.10)$$

kde $P(L)$ je výkon ve vzdálenosti L , P_0 je počáteční výkon a t_{atm} je propustnost atmosféry definovaná pro vzdálenost L jako (1.11) [1],

$$t_{atm} = \exp\{-\alpha \cdot L\} \quad (1.11)$$

kde α [km^{-1}] je koeficient útlumu. [1]

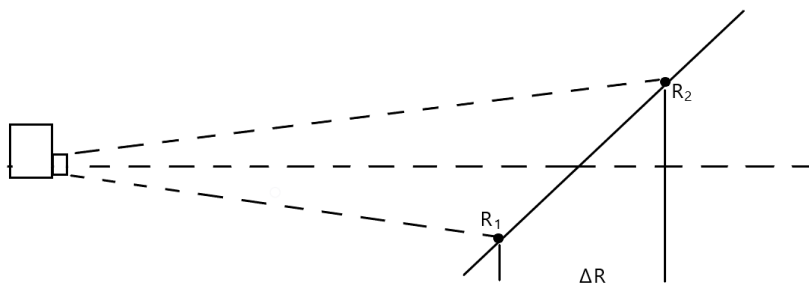
Ten lze také vyjádřit jako $\alpha = \alpha_{abs} + \alpha_{scat}$, kde α_{abs} představuje útlum způsobený absorpcí. Jelikož je atmosféra složena z různých plynů, vznikají zde tzv. okna propustnosti (viz obrázek 1.2). Je tedy zřejmé, že určité vlnové délky budou procházet atmosférou s menším útlumem než jiné.

Druhou součástí koeficientu útlumu α je útlum způsobený rozptylem α_{scat} . Tento koeficient zahrnuje všechny rozptyly, ke kterým při šíření světla dochází. Jedná se o Rayleighovo rozptyl, pokud k němu dochází na částicích menších než je vlnová délka použitého světla, Mieho rozptyl, ke kterému dochází v případě, že rozptylující částice jsou srovnatelné s vlnovou délkou a geometrický rozptyl na částicích větších než je vlnová délka.

Druhou skupinou jevů ovlivňujících měření jsou turbulence. Jedná se o souhrn jevů, které způsobují rychle se měnící nehomogenity v atmosféře jako například změny hustoty vzduchu. Projevují se lokální změnou indexu lomu nebo např. teplotními gradienty. Na rozdíl od turbidity je změna indexu lomu malá, ale dochází k ní na velkých oblastech. Turbulence lze popsat pomocí strukturního parametru indexu lomu C_n^2 [$m^{-\frac{2}{3}}$] [5]. Při průchodu turbulentními buňkami dochází k difrakci signálu, což má za následek prodloužení optické dráhy, která je pak větší než skutečná vzdálenost mezi dálkoměrem a cílem. Vzhledem k tomu, že se turbulence mění s časem, je velmi obtížné je kompenzovat.

Měření ovlivňuje také samotný měřený cíl a geometrie měření. Je rozdíl, zda je cílem difuzní povrch, který odráží světlo do všech směrů, nebo zrcadlový povrch, pro který platí zákon odrazu. Ve druhém případě je zásadní, pod jakým úhlem je dálkoměr vůči cíli, protože může nastat situace, že vyslaný signál bude od cíle odražen a zcela mine přijímač dálkoměru. Pokud je cíl šikmo k dálkoměru nebo má komplikovaný tvar, tak různá měření budou dávat mírně odlišné výsledky podle toho, na které konkrétní místo signál dopadne, protože mírné vychýlení dálkoměru může způsobit posun na cíli. U cílů kolmo k dálkoměru je výhoda, že každý bod cíle má stejnou vzdálenost k dálkoměru a nezáleží na tom od jakého místa se signál odrazí. Při odrazu od šikmých cílů se prodlužuje délka pulzu a tím se mění i tvar pulzu. Pokud

budeme uvažovat cíl větší než je plocha dopadajícího pulzu (viz obrázek 1.3), pak bude šířka dopadajícího pulzu 1.12,



Obrázek 1.3: Schéma měření cíle šikmého vzhledem k dálkoměru.

$$\tau = \tau_0 + \frac{\Delta R}{c} \quad (1.12)$$

kde τ je šířka vyslaného pulzu a ΔR je vzdálenost mezi nejbližším a nejvzdálenějším bodem cíle, od kterých se odrazí signál zpět, jak je patrné z obrázku 1.3.

U difuzních povrchů hraje důležitou roli odrazivost či činitel odrazu (označováno také jako albedo). Jedná se o poměr odraženého a dopadajícího záření. Ta je závislá na vlnové délce, ale obecně můžeme říct, že některé cíle odrážejí podstatně více světla než jiné. Jako příklad si uvedeme bílý papír s odrazivostí dosahující téměř 100 % a pneumatiky s pouhými dvěma procenty (tyto hodnoty platí pro vlnovou délku 900 nm). Roli hraje také velikost cíle. S tím souvisí i volba vhodné divergence při konstrukci přístroje a zvětšení u pozorovací větve. U dálkoměrů pro vojenské účely je definován standardizovaný cíl NATO $2,3 \times 2,3$ m. Tento rozměr byl určen, protože přibližně odpovídá čelnímu profilu tanku.

Různé otřesy během měření, jako například stisk tlačítka mohou způsobit, že při vyslání signálu dálkoměr míří jinam, než kam byl namířen. Signál se pak může odrazit od jiného cíle, než bylo zamýšleno. Proto je lepší měření provádět na stativu, kde je dálkoměr stabilnější a tím i přesnější, než při měření s přístrojem v ruce.

Někdy se může stát, že dálkoměr není schopen vyhodnotit měření jako jednu dominantní hodnotu. K tomu může dojít například záchvěvem dálkoměru při stisknutí tlačítka nebo se může stát, že před měřeným cílem se nachází nějaké překážky od kterých se signál také odrazí. Všechny tyto klamné výsledky

označujeme jako tzv. echopulzy. Některé dálkoměry při změření více různých vzdáleností, kde nejsou schopny určit jeden dominantní, zobrazují více výsledků. V případě překážky mezi dálkoměrem a cílem, u které lze odhadnout přibližnou vzdálenost, je možné na dálkoměru nastavit tzv. bránu. Dálkoměr bude v tomto případě ignorovat všechny signály, které by měly za následek měření vzdálenosti menší než je hodnota brány.

Měření také ovlivňuje konstrukce pozorovací větve a její souosost s vysílačem. Při měření dochází i k různým druhům rušení, které způsobují excitace elektronů na detektoru. To může zapříčinit falešné detekce. Výrobce uvádí u každého přístroje, kolik procent výsledků jsou falešná měření.

Je tedy zřejmé, že laserový dálkoměr bude schopen měřit jen do určité vzdálenosti a navíc tato vzdálenost je pro každý typ přístroje jiná. Pro porovnání dálkoměrů se určuje jejich dosah. Jde o vzdálenost na kterou je dálkoměr ještě schopen změřit definovaný cíl s definovanou pravděpodobností. Jedná se o pravděpodobnost správného výsledku měření a každý výrobce si její hodnotu definuje podle sebe. Častou se používá pravděpodobnost 99 % nebo také 50 %. Pokud tedy chceme tyto přístroje nějak objektivně hodnotit, je potřeba použít vhodnou metodiku. Běžně se používá výpočet dosahu pomocí extinkčního poměru. Můžeme sice přesně definovat vlastnosti cíle a vzdálenost v jaké se bude nacházet, ale pořád bude měření narušovat neustále se měnící atmosféra. Z tohoto důvodu je vhodné měření přesunout do laboratoře a využít nějaký vhodný měřicí přístroj. Tím může být například LTE měřicí stanice, která je popsána v následující kapitole. Nyní jsou zde ještě v krátkosti popsány dálkoměry, které byly měřeny

1.3 Měřené přístroje

PLRF25C

PLRF25C BLE X3 je vícepulzní monokulární koaxiální laserový dálkoměr obsahující pouze přímou pozorovací větev spřaženou s přijímačem dálkoměru. Je velmi kompaktní a snadno se s ním pracuje. Umístění vysílače a přijímače je na obrázku 1.4 a parametry v tabulce 1.1.



Obrázek 1.4: PLRF25C BLE X3 v předním a zadním pohledu s označením vysílače a přijímače laserového dálkoměru.

Tabulka 1.1: Parametry přístroje PLRF25C BLE X3 [7]

Vlnová délka	1550 nm, Třída 1 pro zrak zcela bezpečná dle IEC 60825-1 Ed
Rozsah měření	5 m až > 6 km
Dosah	3000 m při viditelnosti 15 km, cíl 2,3 m × 2,3 m, činitel odrazu 0,4, pravděpodobnost detekce > 90 %
Přesnost	± 2 m (pro 50 m až 1500 m) ± 5m (pro < 50 m a > 1500 m)
Počet falešných měření	Neuvedeno
Rozlišení na displeji	0,1 m

Moskito TI+

Moskito TI je monokulární vícepulzní koaxiální laserový dálkoměr a značkovač se třemi pozorovacími větvemi, kde přímé pozorování je spřaženo s nízkojasovou kamerou a přijímačem laserového dálkoměru. Samostatně se pak nachází termovizní kamera. Přístroj má ruční Zoom. Verze TI+ se od TI liší v úpravě bateriového boxu pro použití AA baterií, namísto CR123 používaných u modelu TI. Umístění vysílače a přijímače laserového dálkoměru je na obrázku 1.5. Další specifika přístroje jsou uvedeny v tabulce 1.2.



Obrázek 1.5: Moskito TI+ v předním a zadním pohledu s označeným vysílačem a přijímačem laserového dálkoměru.

Tabulka 1.2: Parametry přístroje Moskito TI+ [6]

Vlnová délka	1550 nm, Třída 1 pro zrak zcela bezpečná dle IEC 60825-1 Ed
Rozsah měření	10 m až 10 km
Dosah	5000 m při viditelnosti 15 km, cíl 2,3 m × 2,3 m, činitel odrazu 0,3, pravděpodobnost detekce 99 %
Přesnost	± 2 m
Počet falešných měření	< 1 %
Rozlišení na displeji	1 m

JIM Compact

Posledním přístrojem, se kterým se pracuje, je dálkoměr JIM Compact. Na rozdíl od předchozích přístrojů se jedná o bi-okulární dálkoměr bez přímé pozorovací větve. Lze přepínat mezi denní kamerou, nízkojasovou kamerou a chlazenou termovizní kamerou. Každá kamera má vlastní objektiv a rovněž vysílač a přijímač dálkoměru mají vlastní objektivy. Součástí je laserový značkovač. Všechny pozorovací větve mají digitální Zoom. Na přijímač a vysílač lze nasadit bezpečnostní filtr pro přesun z Třídy 3 do Třídy 1. Tento přístroj je ze všech tří nejhůře ovladatelný kvůli velikosti a váze. Jedná se však o nejsložitější přístroj vybavený mnoha funkcemi. Na obrázku 1.6 je znázorněno umístění vysílače a přijímače s již nasazeným bezpečnostním filtrem. Parametry přístroje najdeme v tabulce 1.3



Obrázek 1.6: JIM Compact v předním a zadním pohledu s označením vysílače a přijímače laserového dálkoměru.

Tabulka 1.3: Parametry přístroje JIM Compact [8]

Vlnová délka	1550 nm, Třída 1 pro zrak bezpečná dle IEC 60825-1 Ed 3.0
Rozsah měření	10 m až 12 km
Dosah	> 5000 m, cíl NATO (2,3 m × 2,3 m)
Přesnost	± 2 m
Počet falešných měření	< 1 %
Rozlišení na displeji	Není uvedeno

Kapitola 2

LTE měřicí stanice

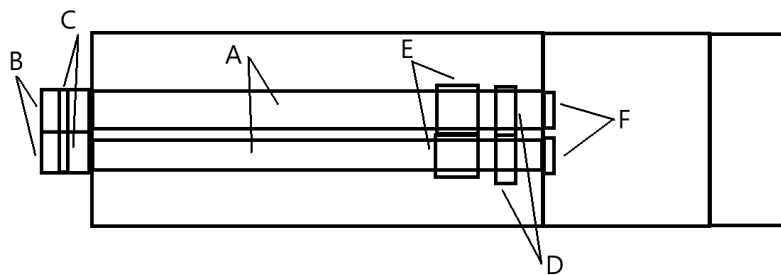
Jak již bylo zmíněno dříve, testování laserových dálkoměrů v terénních podmínkách není ideální, proto je vhodné přejít do laboratoře a použít vhodné měřicí zařízení. Tím může být například LTE měřicí stanice od firmy Inframet (viz obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: LTE měřicí stanice. [16]

LTE stanice umožňuje měření jak základních charakteristik laseru jako je například šířka pulzů, energie pulzů, atd., tak vlastností dálkoměru jako přesnost měření vzdálenosti, určení dosahu a extinkčního poměru. Navíc, pokud je nějaká část dálkoměru nefunkční, narozdíl od měření v terénu, zde můžeme určit, zde je nefunkční vysílač nebo přijímač. Na LTE stanici mohou být měřeny různé typy dálkoměrů. Základní varianta, se kterou se bude pracovat, umožňuje měření dálkoměrů s odděleným vysílačem a přijímačem, přičemž pozorovací větev musí být koaxiální s jednou z větví dálkoměru, nebo

blízko nich. Pokročilejší varianta umožňuje také měření dálkoměrů s pozorovací větví vzdálenou od větví dálkoměru, případně s termovizní větví. S touto variantou je možné také měřit dálkoměry, které mají koaxiální vysílač a přijímač.



Obrázek 2.2: Schéma LTE měřicí stanice.

Na obrázku 2.2 je schéma LTE měřicí stanice. Stanice má dva kanály dlouhé cca 1 m (A), na vstupu jsou kruhové apertury o průměru 7 cm (B), které jsou konstruovány tak, aby bylo možné umístit externí filtry (C), pokud by byl laser dálkoměru příliš silný. Uvnitř stanice se nachází atenuátory s diskrétními hodnotami (D) a cíle (apertury) různých velikostí (E). V zadní části stanice jsou na koncích kanálů montáže k uchycení měřících prvků (F). Díky tomu lze prohazovat pozice vysílačím a přijímačím kanálu stanice, dle konstrukce dálkoměru. Stanice nabízí dvě možné konfigurace, v první je zapojen detektor a LED dioda. V tomto režimu můžeme zkoumat parametry pulzů a simulovat vzdálenosti pro ověření přesnosti a opakovatelnosti měření dálkoměru. Při druhé konfiguraci jsou oba kanály propojeny pomocí optického vlákna délky 1200 m s kontinuálním atenuátorem. V tomto módu lze měřit dosah dálkoměru a extinkční poměr. Veškeré ovládání se provádí přes PC spojený se stanicí pomocí programů LE Control, LF Control, MET Control a Pulse Browser. V tabulce 2.1 jsou uvedeny některé technické údaje.[9]

Při měření je před LTE stanicí umístěn zkoumaný dálkoměr tak, aby s ní byl na optické ose. pokud bude nakloněn může dojít k odrazům od optických ploch uvnitř stanice a zkreslení výsledků měření. Při umístění je také dodržet to, aby do jednoho kanálu zasahoval pouze vysílač dálkoměru a do druhého pouze přijímač. Překrytí apertur dálkoměru a stanice nemusí být dokonalé,

Tabulka 2.1: Technické parametry LTE měřící stanice. [9]

Velikost testů	0,25 mrad, 0,5 mrad, 0,75 mrad, 1 mrad, 1,5 mrad, 2 mrad, 4 mrad
Měřitelné vlnové délky	910 nm, 1060 nm, 1540 nm, 1550 nm, 1570 nm
Simulovatelné vzdálenosti	100 m až 40 km, rozlišení 2 m
Počet simulovatelných odrazů (ozvěň)	Min. 3 s regulovaným rozestupem 50 m až 6000 m, rozlišení 2 m

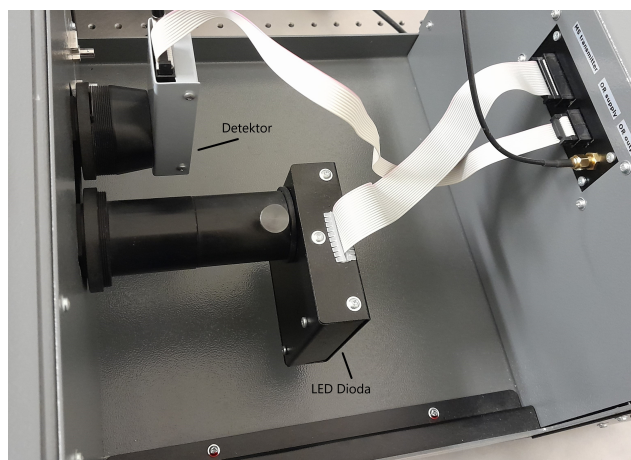
ale je vhodné, pro co nejlepší výsledky, zajistit co největší překryv. Pokud část přijímače dálkoměru přesahuje přes aperturu stanice, měla by být přelepena černou páskou, aby se zamezilo možným rušivým signálům z okolí.

2.1 LE Control

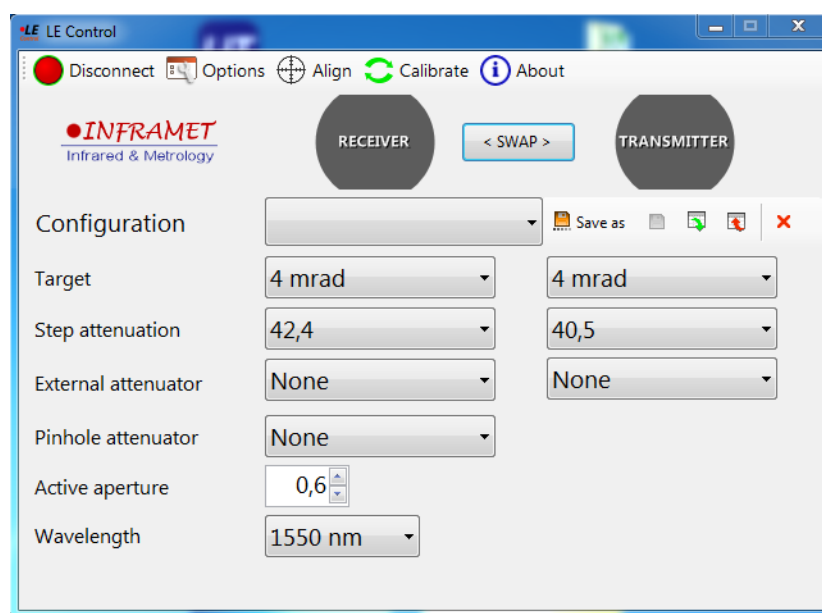
Program LE Control neslouží sám k měření, ale je zapotřebí k nastavení parametrů LTE stanice pro použití programů Pulse Browser a MET Control. Při těchto měřeních je stanice zapojena v konfiguraci 1.

Při měření v konfiguraci 1 (viz obrázek 2.3) zapojíme detektor do kanálu kam směřuje vysílač detektoru, tento kanál budeme dále označovat jako kanál vysílače, do druhého kanálu, dále označovaného jako kanál přijímače, umístíme LED diodu. Toto zapojení je velmi důležité, při opačném zapojení může dojít k poškození dálkoměru nebo stanice. V počítači spustíme program LE Control jehož vzhled je na obrázku 2.4 a zvolíme možnost „connect“.

Pomocí tlačítka swap si označíme kanály stanice (pozn. Označení receiver a transmitter v programu LE Control je pouze informativní, při našem měření, tj. na obrázcích, jsme používali opačné označení, než bylo uvedeno výše.), bez ohledu na označení levý sloupec ovládá levý kanál a analogicky pravý ovládá pravý (z pohledu uživatele dálkoměru). Nyní zvolíme velikost testů a úroveň útlumu (attenuace). U volby testu je vhodné zvolit větší velikost, protože zde je menší potřeba přesného nastavení souososti dálkoměru a stanice. Útlum zvolíme libovolně, nelze předem odhadnout, jaká hodnota bude optimální. Pokud nejsou použity žádné externí attenuátory, zvolíme pro všechny další možnosti „none“. Poslední parametr, který je potřeba zadat je aktivní apertura, tedy překryv apertury přijímače dálkoměru s aperturou LTE stanice. Nyní je možné spustit měření dálkoměrem. Na čelní straně LTE stanice jsou tři LED kontrolky určující sílu vstupujícího signálu. Pokud se ne-



Obrázek 2.3: Zapojení detektoru a LED diody pro měření v konfiguraci 1.



Obrázek 2.4: Okno programu LE Control s nastavením pro měření PLRF25C BLE X3.

rozsvítí žádná kontrolka, je pravděpodobně špatně nastavená souosost mezi dálkoměrem a LTE stanicí, nebo je laserový vysílač nefunkční. Při rozsvícení zelené kontrolky je vše nastavené správně a je možné přejít k dalším měřením. Rozsvícení červené (označené „too high“) nebo modré (označené „too low“) kontrolky značí nesprávnou attenuaci. Je potřeba v případě červené zvýšit attenuaci (případně přidat externí attenuátor) a v případě modré snížit at-

tenuaci a znovu spustit měření na dálkoměru.

2.2 Pulse Browser

V momentě, kdy je nastaven program LE Control a při spuštění dálkoměru svítí zelená kontrolka, je možné přejít k dalšímu programu (pozn. LE Control zůstává stále spuštěný). Jako další program je vhodné spustit Pulse Browser, který umožňuje měření základních charakteristik laserového signálu. Lze změřit počet a šířku pulzů, jejich výkon, energii a periodu s jakou se opakují. Po spuštění programu Pulse Browser zvolíme možnost „connect“.

Na obrázku 2.5 je okno programu Pulse Browser s popisky ovládacích prvků. Nejdříve je potřeba zadat předpokládanou šířku pulzů (A). Je vhodné zvolit na začátek větší hodnotu, protože program nemá škálování horizontální osy a pokud by reálné pulzy byly delší, než je předpoklad, nebyl by změřen celý signál a měření by bylo třeba opakovat. Dále je třeba zvolit požadovaný operační mód (B), v tomto případě "Frequent pulses" pro měření vícepulzních dálkoměrů. Je vhodné otevřít pokročilé nastavení (C) a upravit další parametry (D). Je dobré spustit jedno měření (E), kdy vyskočí okno o probíhající měření a je třeba stihnout spustit měření dálkoměrem. Při měření je důležité kontrolovat, jestli se na LTE stanici rozsvítí zelená kontrolka. Pokud jsou useknuté špičky pulzů, je třeba zvýšit měřící rozsah (Meter range), případně zvýšit práh (Threshold). Pokud program nezachytí signál laserového vysílače nebo měření nezačíná v nule, je třeba zvětšit dobu měření (Timeout). Pokud pulzy zabírají celý rozsah grafu, je možné, že část na konci nebyla zaznamenána. Lze zvětšit předpokládanou šířku pulzu nebo snížit vzorkování (Min. samples/pulse), to však má za následek deformaci vykreslených jednotlivých pulzů. Zapnutím funkce nuceného intervalu (Force interval) by měl být program schopen zaznamenat pouze jeden pulz. Jednodušší je po měření přepnout graf na zobrazení jednotlivých pulzů (viz obrázek 2.5), kde lze přepínat mezi všemi změřenými pulzy. Poslední nastavitelnou možností je multiplikátor plochy pulzu (Pulse area multiplier), který má význam pouze při měření jednopulzních dálkoměrů.

Pokud jsou parametry nastaveny uspokojivě, aby změřené pulzy začínaly v nule a končily dříve, než rozsah grafu, jak na horizontální, tak na vertikální ose a nedochází k lokálním poklesům výkonu, které mohou být pravděpodobně způsobeny záchvěvem dálkoměru a vychýlením vysílaného svazku mimotest v LTE stanici, lze měření považovat za úspěšné. Nyní je v okně programu zobrazen již zmíněný graf, který zobrazuje průběh výkonu pulzů na čase.



Obrázek 2.5: Okno programu Pulse Browser s nastavením pro měření PLRF25C BLE X3 při zobrazení všech pulzů a s výběrem jednoho pulzu.

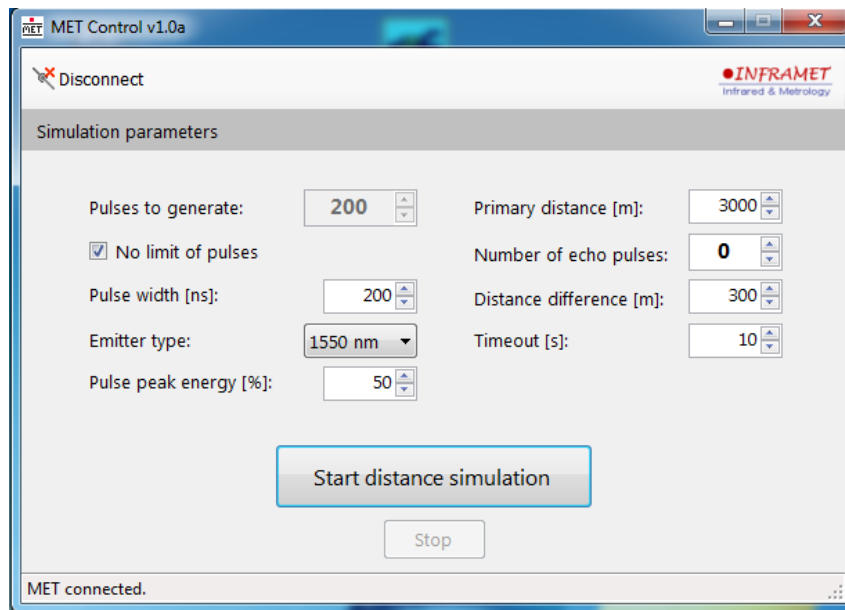
Dále je zobrazena tabulka s výsledky měření, kde je zobrazen výkon pulzu, šířka pulzu v čase, energie pulzu a perioda s jakou se pulzy opakují. Je zde vždy zobrazena nejvyšší a nejnižší hodnota a průměrná hodnota s odchylkou. Mimo tabulku je pak ještě zobrazen počet naměřených pulzů. Po přepnutí grafu na zobrazení jednotlivých pulzů se změní tabulka a jsou zobrazeny šířka

pulzu, jeho začátek v čase, energie a střední výkon. Nad tabulkou jsou pak šipky na listování mezi jednotlivými pulzy.

2.3 MET Control

Další program, který lze použít je MET Control. Pomocí tohoto programu lze simulovat různé vzdálenosti a testovat, zda je dálkoměr schopen je změřit a s jakou přesností. LE Control musí zůstat zapnutý, Pulse Browser se může odpojit a vypnout, ale není to nezbytné. MET Control je potřeba připojit přes tlačítko „connect“. Na obrázku 2.6 je okno programu. Před měřením je potřeba nastavit několik parametrů rozdělených do dvou sloupců. První se týká vlastností generovaných pulzů. Je možno nastavit jejich pulzů, případně označit možnost pro generování pulzů bez limitu. Dále je třeba nastavit šířku pulzu, která byla zjištěna v předchozím měření pomocí Pulse Browser. Velmi důležité, je zvolit správnou vlnovou délku. Dále je možné nastavit energii pulzu. Ve druhém sloupci se nastavují parametry týkající se simulované vzdálenosti. Nejdůležitější je samotná vzdálenost, kterou má LTE stanice simulovat. Dále lze nastavit určité množství echopulzů a jejich rozestup. Poslední věc, kterou lze nastavit je časové okno, během něhož LTE stanice čeká na příchozí signál z dálkoměru.

Po nastavení všech potřebných parametrů lze spustit simulaci. Následně se objeví informační okno o přípravě simulace a následné oznámení, že je spuštěno časové okno pro měření. V tomto čase musí být spuštěno měření dálkoměrem. Je zde zase potřeba kontrolovat, zda se rozsvítí zelená kontrolka na LTE stanici, jinak by bylo potřeba upravit attenuaci v programu LE Control. Pokud dálkoměr zobrazí naměřenou vzdálenost, měření proběhlo úspěšně. V opačném případě je možné, že přijímač nebyl schopen zachytit signál. Protože až do teď nebyl přijímač potřeba, je možné, že je dálkoměr špatně uchycen vzhledem k sousednosti s LTE stanicí. Změna polohy dálkoměru může zapříčinit potřebu úpravy attenuace. Také je možné, že simulovaná vzdálenost byla příliš velká, proto je vhodné začít se simulací menších vzdáleností a postupně je zvedat až k hranici rozsahu měření uvedeného v příručce k přístroji (viz např. tabulku 1.1). Měření je vhodné několikrát zopakovat, aby se daly porovnat hodnoty zobrazené dálkoměrem. To jak se výsledek měření liší od simulované hodnoty je jedna věc, ale je důležité i jak se liší několik po sobě jdoucích stejných měření.



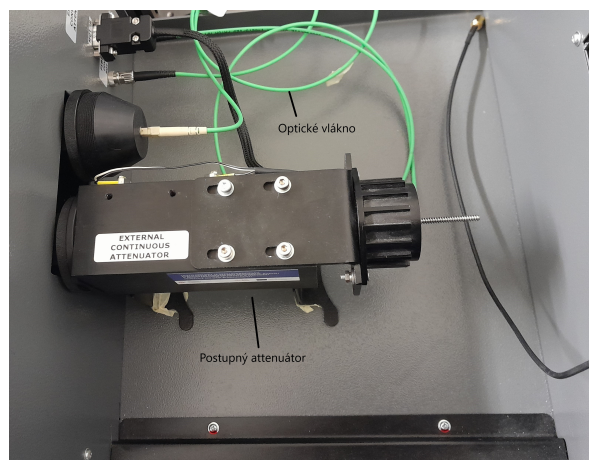
Obrázek 2.6: Okno programu MET Control s nastavením pro měření PLRF25C BLE X3.

2.4 LF Control

Posledním programem, který se používá s LTE stanicí je LF Control. Pomocí tohoto programu lze změřit extinkční poměr a dosah dálkoměru. Pro měření s programem LF Control se musí vypnout program LE Control a změnit LTE stanicí na konfiguraci 2, tak že se místo detektoru a LED diody připojí optické vlákno s postupným attenuátorem (viz obrázek 2.7). Attenuátor je složen z těla uvnitř něž se pohybuje vnitřní kus s upevněným optickým vláknem. Pohyb je zajištěn pomocí přesného krokového motoru. Pohybem vnitřní části se mění vzduchová mezera mezi výstupem z LTE stanice a čelem optického vlákna. Tato mezera je v programu LF Control přepočítána na útlum. Attenuátor se připojuje místo detektoru a místo LED diody je připojí druhý konec vlákna. Tato konfigurace se používá k měření dosahu dálkoměru a extinkčního poměru. Extinkční poměr se používá k výpočtu dosahu dálkoměrů a je definován jako (2.1)

$$ER = 10 \cdot \log Y, \quad (2.1)$$

kde Y je hodnota útlumu při které dálkoměr již neměří správně [11].



Obrázek 2.7: Zapojení postupného attenuátoru a optického vlákna pro měření v konfiguraci 2.

Dosah R_{LRF} je pak vypočten z rovnice (2.2) [11]

$$\left(\frac{R_i}{R_{LRF}} \right)^2 = 10^{\left(\alpha \frac{R_{LRF}}{10} \right)}, \quad (2.2)$$

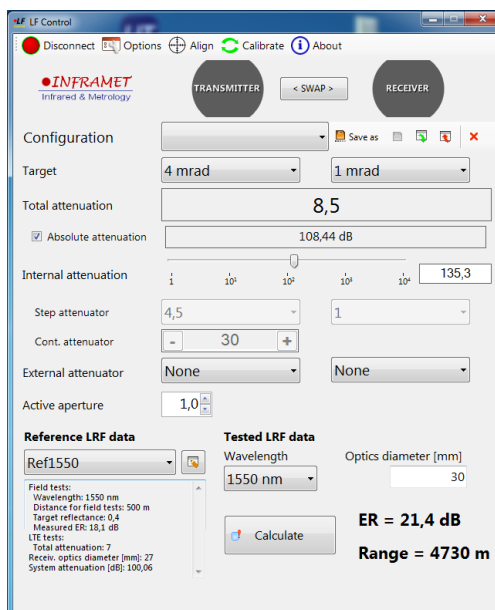
kde α je koeficient útlumu atmosféry a R_i je ideální dosah vypočtený jako

$$R_i = D\sqrt{Y}, \quad (2.3)$$

kde D je vzdálenost měřeného objektu. [11]

Pro měření je třeba spustit program LF Control a zvolit „connect“, ostatní programy včetně LE Control musejí být vypnuté.

Na obrázku je okno programu LF Control. Na rozdíl od LE Control, zde je třeba dbát na správné označení kanálů LTE Stanice. Jako „transmitter“ se označí kanál, do kterého vysílá dálkoměr signál a jako „receiver“ kanál, ze kterého se vrací signál zpět do dálkoměru. Před měřením je třeba navolit velikost testů, případné externí attenuátory a aktivní aperturu. Aby program vypočetl správně extinkční poměr a dosah, musí být zadána správná vlnová délka a průměr objektivu přijímače. Poslední, co musí být zvoleno, je referenční dálkoměr, který lze vybrat z nabídky, případně do programu uložit vlastní data z terénního měření. Jak je vše navoleno, pomocí posuvníku se postupně zvedá hodnota útlumu, kterou následně LTE stanice nastavuje pomocí skokových attenuátorů a postupného attenuátoru. Po nastavení útlumu se provede několik měření dálkoměrem. Dálkoměr by měl naměřit vzdálenost



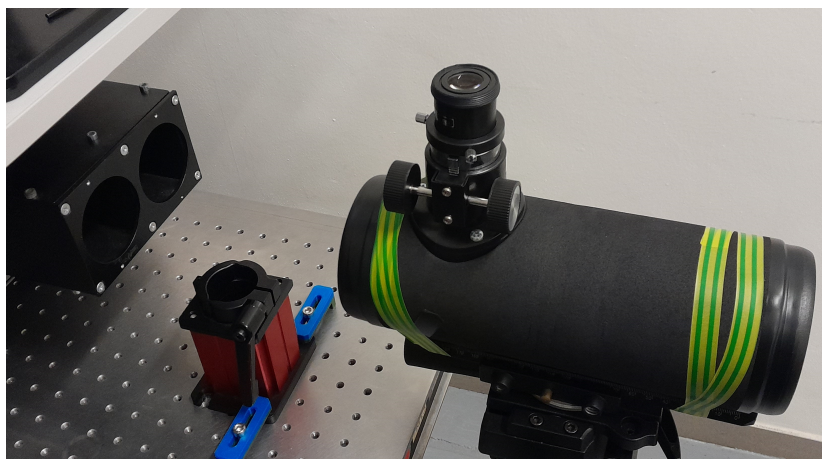
Obrázek 2.8: Okno programu LF Control.

přibližně 1200 m. V momentě kdy dálkoměr správně určí vzdálenost u poloviny měření, je útlum nastaven správně. Nyní volbou „Calculate“ se zobrazí výsledný extinkční poměr a dosah dálkoměru.

Kapitola 3

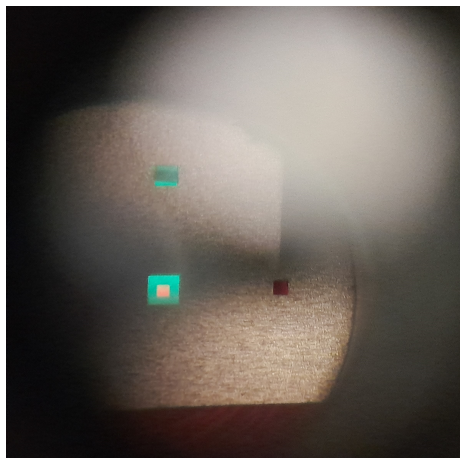
Laboratorní měření dosahu

V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření několika dálkoměrů. Pro každý typ dálkoměru je zde uvedeno jedno měření a zbytek je uveden v Appendixu. Před měřením je vhodné provést ověření souososti kanálů LTE stanice a případnou kalibraci. Před LTE stanicí se umístí měřící teleskop tak, aby bylo vidět do obou kanálů (viz obrázek 3.1) a v programu LE control se nastaví různé velikosti testů pro každý kanál. Při pohledu do měřícího teleskopu by při správném nastavení mělo být vidět obraz menšího testu uprostřed většího (viz obrázek 3.2). Pokud je menší test vychýlen do strany, je třeba upravit pozici testů. V našem případě je souosost v pořádku.



Obrázek 3.1: Měřící teleskop pro ověření souososti.

Výsledky z měření v programu Pulse Browser se zobrazují zprůměrované a se směrodatnou odchylkou. Nenabízí se zde moc možností na další vyhodnocování. Ale lze například využít znalosti tvaru pulzu zobrazeného v grafu



Obrázek 3.2: Pohled do měřícího teleskopu.

a s pomocí rovnic 1.5, 1.7 a 1.8 ověřit dosazením změřených parametrů, zde změřená energie a šířka pulzu odpovídají naměřenému výkonu. Nejistotu výkonu lze pak vypočítat pomocí zákona šíření nejistot v odmocninném tvaru 3.1

$$\sigma_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P(\tau, E_0)}{\partial E_0}\right)^2 \cdot \sigma_{E_0}^2 + \left(\frac{\partial P(\tau, E_0)}{\partial \tau}\right)^2 \cdot \sigma_\tau^2} \quad (3.1)$$

kde $P(\tau, E_0)$ je rovnice použitého tvaru pulzu, σ_{E_0} je nejistota energie pulzu E_0 a σ_τ je nejistota šířky pulzu τ .

Hlavním výstupem z měření v programu Pulse Browser je znalost šířky pulzu pro další měření.

Při simulaci vzdáleností se sleduje zda rozdíl mezi simulovanou a změřenou hodnotou je menší než maximální požadovaná nejistota měření. Ta se skládá ze součtu nejistoty LTE stanice a nejistoty deklarované výrobcem dálkoměru. Dále lze vypočítat průměrnou hodnotu měření konkrétní vzdálenosti a příslušnou směrodatnou odchylku σ (3.2),

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_n - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (3.2)$$

kde x_n je n-tá hodnota, \bar{x} je průměrná hodnota a n je počet měření.

Průměrná hodnota sice neposkytuje relevantní informace, ale pomocí směrodatné odchylky lze sledovat jak se liší výsledky při opakovaném měření

stejně vzdálenosti. V tomto případě neuvažujeme, že známe skutečnou vzdálenost, kterou si kvůli nepřesnosti LTE stanice nemůžeme být jisti, ale pozorujeme pouze, jak moc se liší výsledky měření od jejich střední hodnoty. Výhodou směrodatné odchylky je, že s ní lze porovnávat výsledky měření různých vzdáleností. Zde není žádná určená hodnota, ale platí, že čím je odchylka menší, tím jsou menší rozdíly ve výsledcích při opakovaném měření stejné vzdálenosti. V praxi je měření dálkoměrem prováděno pouze jednou a dálkoměr s nižší směrodatnou odchylkou se bude jevit jako spolehlivější, než dálkoměr s vysokou, u kterého by se dvě měření stejného cíle mohly významně lišit.

Posledním měřením prováděným na LTE stanici je určení extinkčního poměru a dosahu pomocí programu LF Control. Zde program vypočítá výsledky na základě nastaveného útlumu, který je složený z hodnot attenuátorů, ale také z průměru apertury dálkoměru a velikosti nastavených apertur uvnitř LTE stanice. Výsledky lze ověřit dosazením do rovnic 2.1 a 2.2.

3.1 Měření PLRF25C na LTE

Jako první byly měřeny přístroje PLRF25C BLE X3. Bylo změřeno celkem 12 kusů přístrojů značené sériovými čísly B170 až B181. Nastavení programu LE Control pro měření s programem MET Control je v tabulce 3.1 a nastavení programu MET Control v tabulce 3.2. S každým dálkoměrem bylo změřeno několik simulovaných vzdáleností, a to desetkrát pro statistické vyhodnocení. Dálkoměry B170 a B171 měly poslední simulovanou vzdálenost 10 km, kterou už přístroje nebyly schopny změřit, proto pro ostatní přístroje byla poslední simulovaná vzdálenost změněna na 9 km. Výsledky měření přístroje B170 jsou v tabulce 3.3 a výsledky ostatních přístrojů jsou uvedeny v Appendixu. V ojedinělých případech může dálkoměr naměřit více různých vzdáleností v důsledku odrazů signálu na optických plochách uvnitř kanálů LTE stanice. Z tohoto důvodu byly v těchto případech zaznamenány pouze nejmenší hodnoty, jakožto nejrelevantnější.

Tabulka 3.1: Nastavení LE Control při měření s programem MET Control u PLRF25C.

Target	4 mrad / 4 mrad
Attenuation	12,6/12
Aktivní apertura	0,6
Vlnová délka	1550 nm

Tabulka 3.2: Nastavení programu MET Control při měření PLRF25C.

Pulzy	Bez limitu
Šířka pulzu	200 ns
Energie pulzu	50 %
Ozvěny	0
Čas	10 s

Tabulka 3.3: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B170.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	10000
Měření č. 1	502,1	1000,3	3001,1	5001,6	7001,8	X
2	502,1	1000,3	3000,8	5001,3	7002,1	X
3	502,1	1000,3	3001,0	5001,4	7002,0	X
4	502,2	1000,4	3001,0	5001,4	7002,0	X
5	502,2	1000,3	3000,8	5001,4	7001,9	X
6	502,1	1000,3	3001,0	5001,3	7001,9	X
7	502,2	1000,4	3000,9	5001,4	7001,9	X
8	502,1	1000,3	3000,8	5001,3	7002,0	X
9	502,2	1000,4	3000,8	5001,5	7001,8	X
10	502,2	1000,5	3000,7	5001,5	7001,9	X
Průměr	502,15	1000,35	3000,89	5001,41	7001,93	X
Směrodatná odchylka	± 0,02	± 0,02	± 0,04	± 0,03	± 0,03	X

U naměřených dat lze pozorovat zda výsledek měření dálkoměrem je v toleranci udávané výrobcem. Avšak LTE stanice má udanou nejistotu se kterou simuluje vzdálenosti, a to 2 m (viz tabulka 2.1). Pro dálkoměr PLRF25C je výrobcem udaná nejistota měření 2 až 5 m v závislosti na vzdálenosti cíle dle tabulky 1.1. Výsledná nejistota měření je pak součet nejistot LTE stanice a dálkoměru. V případě PLRF25C je tedy maximální povolená nejistota měření vzdáleností do 1500 m 4 m a pro větší vzdálenosti 7 m. Pro PLRF25C číslo B170 (viz tabulka 3.3) je požadavek na maximální nejistotu měření splněn. Vzhledem k tomu, že nejistota měření dálkoměru je v jednotkách metrů, je zavádějící zobrazovat výsledky na desetiny metru. Jedině, že by přesnost dálkoměru byla lepší, než výrobce deklaruje. Druhá věc, která jde z naměřených dat pozorovat je, jak se liší výsledky při opakovaném měření stejné vzdálenosti. To lze vyjádřit pomocí směrodaté odchylky 3.2. Pro přístroj B170 se směrodatná odchylka pohybuje od 0,02 m do 0,04 m. Při porovnání výsledků padlších přístrojů, které jsou uvedeny v Appendixu, je vidět, že se výsledky od simulovaných hodnot liší maximálně o 2,6 m, což je hluboko v toleranci nejistoty měření. Směrodatné odchylky se pak pohybují

v rozsahu 0 m až 0,2 m.

Dále bylo provedeno měření v programu Pulse Browser. V tabulce 3.4 je nastavení programu LE Control a v tabulce 3.5 nastavení programu Pulse Browser. Měření bylo pro každý přístroj provedeno třikrát. Zde je uvedeno měření přístroje číslo B1700 a zbylé přístroje jsou v Appendixu.

Tabulka 3.4: Nastavení programu LE Control při měření s programem Pulse Browser u PLRF25C.

Target	4 mrad / 4 mrad
Attenuation	42,4/40,5
Aktivní apertura	0,6
Vlnová délka	1550 nm

Tabulka 3.5: Nastavení programu Pulse Browser pro měření PLRF25C.

Šířka pulzů	200 ns
Napětí	500 mV
Práh	25 %
Čas	5 s
Počet vzorků	10

V tabulce 3.6 jsou přepsány výsledky z programu Pulse Browser. Výsledky jsou velmi závislé na nastavení programů, ale i na uchycení samotného dálkoměru. Z toho důvodu se opakovaná měření jednoho přístroje mohou lišit. Navíc většina parametrů je vypočítávána ze změřeného tvaru pulzů, kde však nelze nastavit dostatečně velké vzorkování, protože pak nedojde ke změření celého signálu, a tím pádem mohou být pulzy zdeformované. Pro ověření správnosti výsledků je zvolen Gaussovský pulz 1.7. Ze změřených středních hodnot energie a šířky pulzu pak vychází pro jednotlivá měření výkon $(22, 2 \pm 0, 8)$ W pro první měření, $(23, 5 \pm 1, 1)$ W pro druhé a $(23, 1 \pm 0, 9)$ W pro třetí měření. Výsledky ani po započtení nejistot neodpovídají změřenému výkonu, ale po zvětšení nejistoty na dvojnásobek, by již odpovídaly. Lze předpokládat, že rozdíl ve výsledcích je způsoben tím, že použitý profil pulzu se výrazněji liší od reálného, který dle obrázku 2.5 má náběžnou hranu podobající se parabole. Vzhledem k tomu, že dálkoměr vysílá několik oddělených balíků pulzů, jak lze vidět na obrázku 2.5, není program Pulse Browser schopen rozlišit mezery mezi pulzy uvnitř balíku s mezerami mezi balíky. Kvůli tomu je třeba vnímat u parametru perioda minimální hodnotu jako interval mezi

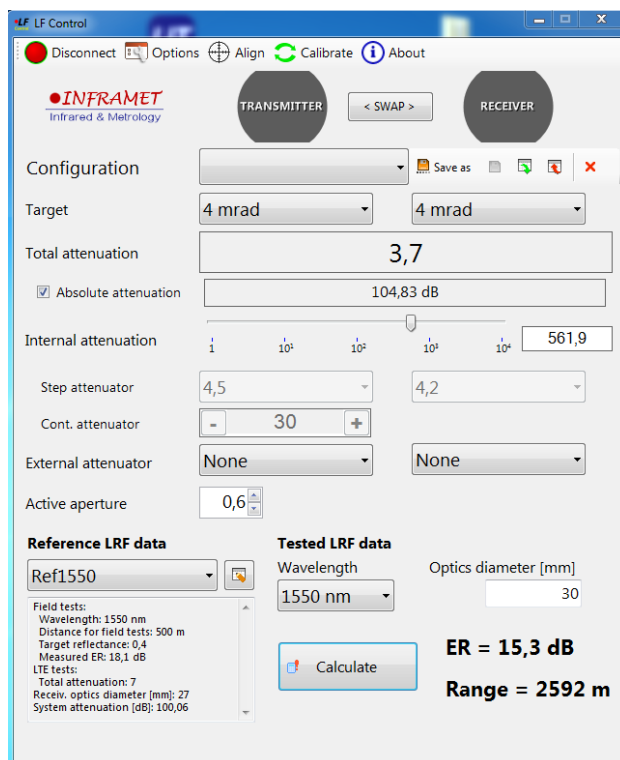
Tabulka 3.6: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B170.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	18,0	21,6	19,7	0,590
	2	17,7	22,8	21,0	0,964
	3	18,0	22,7	20,5	0,937
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	189	6,27
	2	176	208	187	8,03
	3	176	208	188	7,37
Energie pulzu [μ J]	1	3,50	3,97	3,72	0,0741
	2	3,40	4,08	3,90	0,0593
	3	3,52	4,07	3,85	0,0643
Perioda [ms]	1	0,101	6,470	0,119	0,210
	2	0,101	6,630	0,119	0,210
	3	0,101	6,510	0,119	0,209
Počet pulzů	1	-	-	3072	-
	2	-	-	3072	-
	3	-	-	3072	-

pulzy uvnitř balíku a maximální hodnotu jako interval mezi balíky. Průměrná hodnota a odchylka zde tak pozbývají smysl. Při porovnání výsledků dalších přístrojů z Appendixu je zajímavé, že se liší napříč přístroji počet pulzů, a to i o několik desítek. Vzhledem k tomu, že výrobce neuvádí jaký by měl mít přístroj počet pulzů, lze jen předpokládat, že totožné přístroje by měly vysílat stejný počet pulzů. Při měření bylo zjištěno, že výsledky měření jsou citlivé na uchycení přístroje vzhledem k LTE stanici a je tedy možné, že je tím ovlivněn i počet změřených pulzů. Nevýhodou programu Pulse Browser je, že z něj nelze získat surová data z měření, ze kterých by si uživatel mohl sám vytvořit graf průběhu měření.

Posledním měřením bylo měření extinčního poměru a dosahu dálkoměru PLRF25C. V tomto případě se již nepoužívá program LE Control, ale všechno nastavení a měření se provádí v programu LF Control. Nastavení pro měření dálkoměru PLRF je na obrázku 3.3.

V programu LF Control se nastavuje útlum do té doby, než měření dálkoměrem bude mít padesátiprocentní úspěšností. Prakticky je provedeno 10 měření a pokud přesně v pěti případech dálkoměr změří správnou vzdálenost a ve zbylých pěti nezměří nic, bez ohledu na pořadí těchto měření, je útlum považován za správně nastavený. Útlum je složen ze dvou částí, první jsou



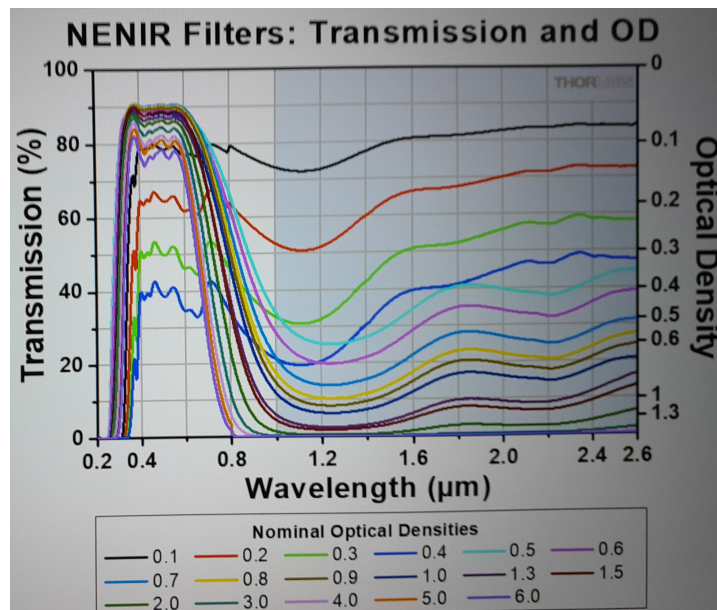
Obrázek 3.3: Měření extinkčního poměru a dosahu dálkoměru PLRF25C B170.

skokové attenuátory uvnitř LTE stanice a druhou je postupný attenuátor připojený s optickým vláknem namísto detektoru a led diody. Z důvodu poruchy postupného attenuátoru není LTE stanice schopna nastavit libovolný útlum, ale pouze několik diskretních hodnot pomocí skokových attenuátorů. Kvůli tomu jsou výsledný extinkční poměr a dosah pouze přibližné. Pro dálkoměr PLRF činí extinkční poměr přibližně 15,3 dB a dosah je přibližně 2592 m. Při dosazení hodnot z obrázku 3.3 do rovnic 2.1 a 2.2 lze ověřit, že vlivem závady postupného attenuátoru spolu výsledné hodnoty nekorrespondují. Vzhledem k nepřesnosti způsobené poruchou bylo měření s programem LF Control provedeno pouze u přístroje PLRF25C B170.

3.2 Měření PLRF25C v exteriéru

Pro porovnání výsledků z měření na LTE stanici byl extinkční poměr a dosah přístroje PLRF25C B170 změřen i v exteriéru pomocí ND filtrů. ND (z

anglického „neutral density“), případně česky „šedé“, filtry snižují intenzitu záření všech vlnových délek. V ideálním případě by ND filtry snižovaly intenzitu stejnoměrně bez ohledu na vlnovou délku. V reálných podmínkách to však neplatí a ND filtry mají specifikovaný rozsah vlnových délek, pro které platí udaná hodnota optické hustoty. Proto bylo potřeba pro měření s dálkoměry, které pracují s vlnovou délkou 1550 nm, použít ND filtry určené pro blízkou infračervenou oblast (NIR). Konkrétně jde o ND filtry pro NIR oblast od firmy Thorlabs, které jsou navrženy především pro použití na 1550 nm. Na obrázku 3.4 je vidět, že jejich propustnost, resp. optická hustota se v blízké infračervené oblasti, cca 1000 nm až 2600 nm, mění jen málo a můžeme ji v jistém zjednodušení považovat za konstantní. Navíc jsou navrženy tak, aby ve viditelné oblasti byly dobře propustné, díky tomu nebrání vizuálnímu pozorování dálkoměrem a míření na cíl.[12]



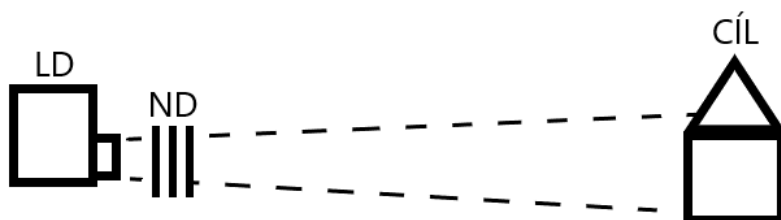
Obrázek 3.4: Graf propustnosti resp. optické hustoty ND filtrů pro NIR oblast [12].

Mezi propustností a optickou mohutností je vztah 3.3

$$T = 10^{-OD}, \quad (3.3)$$

kde T je propustnost a OD optická hustota. [12]

Měření probíhá tak, že se s dálkoměrem měří známá vzdálenost a postupně jsou před něj umísťovány ND filtry dokud nepřestane měřit správně (viz obrázek 3.5). K dispozici jsou filtry s optickou hustotou 0,1 (2 kusy); 0,2; 0,5 a 1. K umísťování filtrů slouží stojan s přihrádkami (viz obrázek 3.6). Filtry je třeba umísťovat tak, aby byly před vysílačem i přijímačem. Navíc je třeba, aby byly umístěny co nejvíce kolmo k dálkoměru, aby se zabránilo nechtěným odrazům vyslaného signálu. V tabulce 3.7 jsou změřené vzdálenosti budovy vzdálené 45 m při různé přidané optické hustotě.



Obrázek 3.5: Schéma měření dosahu pomocí ND filtrů.



Obrázek 3.6: Sestava pro měření extinkčního poměru a dosahu v exteriéru.

Tabulka 3.7: Měření vzdáleností v exteriéru při použití ND filtrů.

OD	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Měření číslo 1	45,0	45,1	44,6	44,7	44,6	44,8	44,6	44,8	3,8
2	-	-	-	-	44,7	45,0	44,7	45,0	3,6
3	-	-	-	-	44,7	44,9	44,7	44,8	3,8

Při tomto měření jde o hledání jedné hraniční hodnoty při které dálkoměr přestává měřit správně. U vyšších hodnot optické hustoty bylo provedeno více měření pro ověření sálosti výsledků. Při hodnotě optické hustoty $OD = 0,8$ přestal dálkoměr měřit správně. Zřejmě byl schopen zachytit nějaký zdeformovaný signál odražený od filtru, ale signál odražený od měřeného cíle už nebyl schopný dopadnout na přijímač tak, aby mohl být detekován. Při dosazení $Y = 10^{OD}$ do rovnic 2.2 a 2.3 získáme dosah. Hodnotu atmosférického útlumu uvažujeme pro průzračnou atmosféru $\alpha = 0,2 \text{ km}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že rovnice 2.2 je transcendentní a R_{LRF} nejde vyjádřit na jedné straně rovnice, byl výpočet proveden tak, že do každé strany rovnice zvlášť byly dosazovány za R_{LRF} hodnoty vzdálenosti s krokem 2 m. S rostoucí hodnotou levá strana klesá a pravá roste, hodnota, při které poprvé pravá strana překoná levou a tedy těsně předtím došlo k rovnosti obou stran, je pak hledanou hodnotou dosahu. Při měření vzdálenosti 45 m (viz tabulka 3.7) je výsledný dosah 114 m. Tato hodnota je však příliš nízká. Lze tedy předpokládat, že kvůli odrazu od filtrů nebylo možno dosáhnout správné hodnoty útlumu. Proto bylo provedeno několik dalších měření na větší vzdálenosti, kde by mělo být zapotřebí méně filtrů. V tabulce 3.8 jsou změřené vzdálenosti při rostoucím útlumu.

Tabulka 3.8: Měření větších vzdáleností v exteriéru při použití ND filtrů.

OD	Změřená vzdálenost [m]					
0	326,9	396,0	1293,6	3435,8	4340,3	6625,8
0,1	326,8	396,0	1294,4	3438,5	4340,3	-
0,2	327,3	396,4	1294,4	3444,3	-	-
0,3	327,4	-	1293,6	-	-	-
0,4	-	-	-	-	-	-

Aby se při měření omezil vliv odrazu od filtrů, bylo v dálkoměru nastavena brána, aby dálkoměr ignoroval signály představující vzdálenosti menší než 200 m, a filtry byly pokládány za sebe do jedné přihrádky v boxu tak, aby byly všechny pod stejným úhlem a co nejvíce kolmo k dálkoměru. Při použití stejné metody, jako u předchozího měření, byly změřeny výsledky zobrazené

v tabulce 3.9.

Tabulka 3.9: Výsledné dosahy dálkoměru PLRF25C při měření v exteriéru s ND filtry.

Měřená vzdálenost (D) [m]	326,9	396,0	1293,6	3435,8	4340,3	6625,8
Hraniční útlum (OD)	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1
Vypočtený dosah (R_{LRF})	514	554	1960	4388	4884	6414

Výsledné dosahy by měly být přibližně rovny nehledě na vzdálenost, při které byly změřeny. Zde to však neplatí. Je možné, že by bylo třeba filtrů s pozvolnějším nárůstem optické hustoty. Navíc v útlumu Y při výpočtu ideálního dosahu (rovnice 2.3) zohledňujeme pouze optickou hustotu. Na útlum mají vliv také odrazy na rozhraních filtrů. Zde však nejsme schopni určit, jaký útlum způsobují. Navíc při měření každého cíle, je potřeba po zamíření dálkoměrem přesunout před dálkoměr stativ s uchycenými testy. Kvůli tomu mají odrazy na různá měření různý vliv. Na měření mohl mít také vliv aktuální stav atmosféry.

3.3 Měření Moskito TI+ na LTE

Dalším typem měřených dálkoměrů bylo Moskito TI+. Měření bylo provedeno na několika kusech označených sériovými čísly V.112.111 až V.112.119. Zde si uvedeme měření kusu V.112.111 a zbylé jsou uvydены v appendixu. Nejdříve bylo provedeno ověření přesnosti měření s programem MET Control. V tabulce 3.10 je nastavení programu LE Control a v tabulce 3.11 nastavení programu MET Control.

Tabulka 3.10: Nastavení LE Control při měření s programem MET Control u Moskito TI+.

Target	4 mrad / 4 mrad
Attenuation	1,8/1,7
Aktivní apertura	0,6
Vlnová délka	1550 nm

Výrobce u Moskita TI+ deklaruje přesnost $\pm 2m$ dle tabulky 1.2. Jelikož Moskito TI+ zobrazuje hodnotu zaokrouhlenou na celé metry, narozdíl

Tabulka 3.11: Nastavení programu MET Control při měření Moskito TI+.

Pulzy	Bez limitu
Šířka pulzu	200 ns
Energie pulzu	50 %
Ozvěny	0
Čas	10 s

Tabulka 3.12: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.111.

Simulovaná vzdálenost [m]	200	500	1000	5000	10000
Měření č. 1	200	501	1000	5001	10002
2	200	501	1000	5001	10002
3	200	501	1000	5001	10002
4	200	501	1000	5001	10002
5	200	501	1000	5001	10002
6	200	501	999	5001	10002
7	200	501	999	5001	10002
8	200	501	1000	5001	10002
9	200	501	999	5001	10002
10	200	501	999	5001	10002
Průměr	200	501	999,6	5001	10002
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	± 0,2	± 0	± 0

od PLRF25C, kde se zobrazují i desetiny metru, tak se výsledky měření (tabulka 3.12) příliš neliší. Kromě měření vzdálenosti 1000 m, kde je směrodatná odchylka 0,2 m, vychází směrodatná odchylka 0 m. To znamená pouze, že opakovaná měření stejné vzdálenosti dávají stejný výsledek. Všechna měření s dálkoměrem Moskito TI+ V.112.111 splňují maximální povolenou nejistotu měření, která po započtení nejistoty měření LTE stanice činí 4 m. Při porovnání s dalšími přístroji, jejichž výsledky měření jsou v Appendixu, je vidět, že všechny přístroje splňují maximální požadovanou nejistotu měření. Směrodatné odchylky se pak pohybují v rozmezí 0 m až 0,2 m.

Dále bylo provedeno měření v Programu Pulse Browser. Nastavení programu LE Control je v tabulce 3.13 a programu Pulse Browser v tabulce 3.14. Zde je uveden přístroj V.112.111 a výsledky dalších dvou měřených přístrojů jsou v appendixu.

V tabulce 3.15 jsou výsledky tří měření. Opět jako u PLRF25C vysílá

Tabulka 3.13: Nastavení programu LE Control při měření s programem Pulse Browser u Moskito TI+.

Target	4 mrad / 4 mrad
Attenuation	138/139
Aktivní apertura	0,6
Vlnová délka	1550 nm

Tabulka 3.14: Nastavení programu Pulse Browser pro měření Moskito TI+.

Šířka pulzů	300 ns
Napětí	1000 mV
Práh	10 %
Čas	10 s
Počet vzorků	15

Tabulka 3.15: Měření parametrů dálkoměru Moskito TI+ V.112.111.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	112,0	366,0	203,0	57,2
	2	130,0	366,0	197,0	56,2
	3	98,7	366,0	206,0	73,5
Šířka pulzu [ns]	1	16,0	48,0	32,2	7,45
	2	16,0	48,0	32,6	7,30
	3	16,0	48,0	30,7	8,81
Energie pulzu [μ J]	1	3,98	8,57	6,21	1,070
	2	4,16	8,43	6,10	0,929
	3	3,60	7,97	5,77	0,827
Perioda [ms]	1	0,200	1,830	0,219	0,163
	2	0,200	1,790	0,219	0,163
	3	0,200	1,790	0,219	0,163
Počet pulzů	1	-	-	1264	-
	2	-	-	1264	-
	3	-	-	1264	-

i Moskito TI+ několik balíků pulzů. V případě Moskita jsou pulzy kratší s větším výkonem. Pulzy jsou pravděpodobně pro měření na LTE stanici s programem Pulse Browser příliš krátké, protože oproti PLRF25C je zde větší rozptyl výsledných hodnot šířky pulzu, jeho výkonu a energie. Při ověření správnosti naměřených hodnot uvažujeme znovu Gaussovský pulz 1.7 a dostáváme výkony $(217, 6 \pm 61, 6)$ W pro první měření, $(211, 1 \pm 56, 6)$ W pro druhé a $(212, 1 \pm 67, 8)$ W pro třetí měření. Zde výkony po započtení odchylek

odpovídají, ovšem v porovnání s PLRF25C jsou zde odchylky mnohonásobně větší. Vzhledem k tomu, že šířka pulzu se pohybuje v nižších desítkách nanosekund, pro zachycení správného průběhu pulzu, který je potřeba k výpočtu dalších parametrů, je třeba vzorkování v jednotkách nanosekund. K tomu by však bylo potřeba počítač s velmi výkonným procesorem. Velký rozdíl mezi minimální a maximální periodou pulzů zde znovu ukazuje, že minimální hodnota představuje mezery mezi pulzy uvnitř balíku a maximální hodnota mezery mezi jednotlivými balíky. Průměrná hodnota a odchylka jsou zde bezvýznamné. I zde, jak u PLRF25C při srovnání z dalšími přístroji v Appendixu je patrné, že počet změřených pulzů se přístroj od přístroje liší.

Program Pulse Browser by měl sloužit ke zjištění parametrů pro další měření, jako je třeba šířka pulzu, kterou je třeba nastavit v programu MET Control. Protože z počátku program Pulse Browser nefungoval, bylo měřeno v programu MET Control s přednastavenou hodnotou šířky pulzu 200 ns. Po zprovoznění Programu Pulse Browser bylo zjištěno, že u přístroje PLRF25C je vše v pořádku, vzhledem k tomu, že má opravdu šířku pulzu přibližně 200 ns. Moskito TI+ má však šířku pulzu výrazně kratší, proto bylo třeba ověřit, zda špatná hodnota tohoto parametru mohla ovlivnit měření při použití programu MET Control. Při ověření se ukázalo, že výsledky měření simulované vzdálenosti jsou stejné.

3.4 Měření JIM Compact na LTE

Posledním přístrojem, který byl měřen, je JIM Compact. Jako první bylo provedeno ověření přesnosti měření simulovaných vzdáleností. V tabulce 3.16 je nastavení programu LE Control pro měření simulovaných vzdáleností a v tabulce 3.17 je nastavení programu MET Control.

Tabulka 3.16: Nastavení LE Control při měření s programem MET Control u JIM Compact.

Target	4 mrad / 4 mrad
Attenuation	138/139
Aktivní apertura	0,6
Vlnová délka	1550 nm

V tabulce 3.18 jsou výsledky simulovaných vzdáleností. Pro dálkoměr JIM Compact platí maximální nejistota měření deklarovaná výrobcem (viz

Tabulka 3.17: Nastavení programu MET Control při měření JIM Compact.

Pulzy	Bez limitu
Šířka pulzu	200 ns
Energie pulzu	50 %
Ozvěny	0
Čas	10 s

Tabulka 3.18: Měření simulovaných vzdáleností přístroje JIM Compact

V.112.120.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	3000	5000	7000	9000	10000
Měření č. 1	1001	3002	5002	7010	9013	10012
2	1013	3004	5001	7008	9008	10016
3	1010	3009	5001	7003	9022	10014
4	1000	3004	5020	7009	9004	10011
5	1002	3002	5021	7011	9002	10005
6	1002	3005	5011	7021	9013	10020
7	1003	3010	5009	7010	9004	10016
8	1010	3006	5006	7004	9006	10015
9	1004	3011	5004	7009	9017	10020
10	1012	3006	5008	7018	9012	10009
Průměr	1005,7	3005,9	5008,3	7010,3	9010,1	10013,8
Směrodatná odchylka	± 3,4	± 2,2	± 5,0	± 3,8	± 4,4	± 3,2

tabulka 1.3) $\pm 2m$. Při započtení nejistoty měření LTE stanice, by měly mít výsledky maximální nepřesnost $\pm 4m$. Z tabulky 3.18 je vidět, že se výsledky místy liší i o 20 metrů. Směrodatná odchylka se pak pohybuje v rozmezí 2,2 m až 5,0 m. To ukazuje, že se opakovaná měření jedné konkrétní vzdálenosti od sebe výrazně liší. K dispozici nebylo více kusů přístroje JIM Compact k porovnání výsledků. Ale vzhledem ke konstrukci přístroje, kdy jsou vysílač i přijímač dálkoměru velmi blízko sebe, bylo obtížné upevnit dálkoměr před LTE stanicí do správné polohy, aby větve dálkoměru směřovaly do správných kanálů LTE stanice. Je tedy velmi pravděpodobné, že dálkoměr byl umístěn mírně nakřivo a při měření docházelo k odrazům od optických povrchů. Tomu nasvědčuje i skutečnost, že změřené hodnoty jsou všechny větší než kolik byla simulace.

Následně bylo provedeno měření v programu Pulse Browser, jehož nastavení je v tabulce 3.20 a nastavení programu LE Control pro měření s progra-

mem Pulse Browser je v tabulce 3.19.

Tabulka 3.19: Nastavení programu LE Control při měření s programem Pulse Browser u JIM Compact.

Target	4 mrad / 4 mrad
Attenuation	138/139
Aktivní apertura	0,6
Vlnová délka	1550 nm

Tabulka 3.20: Nastavení programu Pulse Browser pro měření JIM Compact.

Šířka pulzů	220 ns
Napětí	1000 mV
Práh	25 %
Čas	10 s
Počet vzorků	15

Tabulka 3.21: Měření parametrů dálkoměru JIM Compact V.112.120.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	114	491	320	95,1
	2	131	501	294	39,6
	3	125	372	293	37,5
Šířka pulzu [ns]	1	16,0	32,0	23,0	6,01
	2	16,0	40,0	25,9	3,63
	3	24,0	40,0	27,1	3,91
Energie pulzu [μ J]	1	3,65	7,86	6,83	0,541
	2	5,24	8,42	7,52	0,536
	3	5,01	9,01	7,82	0,614
Perioda [ms]	1	0,200	1,800	0,218	0,162
	2	0,200	1,810	0,218	0,160
	3	0,200	1,810	0,218	0,160
Počet pulzů	1	-	-	1223	-
	2	-	-	1223	-
	3	-	-	1223	-

V tabulce 3.21 jsou výsledky ze tří měření v programu Pulse Browser. Stejně jako u přístroje Moskito TI+ se zde opakuje situace, že parametry závislé na tvaru pulzu mají výrazný rozptyl. Dokonce ještě výraznější než

u přístroje Moskito TI+. To může být způsobeno tím, že dle měření má JIM Compact ještě o něco kratší pulzy než Moskito TI+ a tím pádem by bylo potřeba vzorkování v ještě kratších úsecích (jednotky až desetiny nanosekund). Při ověření správnosti naměřených hodnot uvažujeme znovu Gaussovský pulz 1.7 a dostáváme výkony $(333,6 \pm 90,4)$ W pro první měření, $(326,8 \pm 50,4)$ W pro druhé a $(324,8 \pm 53,0)$ W pro třetí měření. Zde výkony po započtení odchylek také odpovídají, ovšem v porovnání s PLRF25C jsou zde odchylky mnohonásobně větší. Velký rozdíl mezi minimální a maximální periodou pulzů i zde ukazuje, že minimální hodnota představuje mezery mezi pulzy uvnitř balíku a maximální hodnota mezery mezi jednotlivými balíky. Průměrná hodnota a odchylka jsou zde bezvýznamné.

I zde byly měřeny nejdříve simulované vzdálenosti s programem MET Control a až poté parametry v programu Pulse Browser. Simulace vzdáleností byla provedena s nastavenou šířkou pulzů 200 ns a po zjištění skutečné šířky pulzu bylo ověřeno, že se výsledky při zadání správné šířky pulzu neliší.

Závěr

Tato práce je věnována problematice měření dosahu laserových dálkoměrů pro použití v exteriéru. Nejdříve byl čtenář seznámen se základními principy fungování laserových dálkoměrů a jejich dělením. Následně byly rozebrány některé faktory ovlivňující měření. Z toho vyplynulo, že je vhodné terénní měření přenést za využití vhodného měřicího přístroje do laboratoře, kde je větší kontrola vnějších podmínek při měření. Následovalo krátké seznámení s dálkoměry, které budou měřeny. Následně byla představena LTE měřicí stanice, která bude použita pro měření dálkoměrů, a podrobně popsány měřicí programy. V krátkosti byla zmíněna laserová bezpečnost a normy omezující výkon laserů.

V praktické části bylo provedeno s dálkoměry několik měření. Ukázalo se, že dálkoměr JIM Compact není příliš vhodný k měření na LTE stanici vzhledem k jeho konstrukci, kde jsou vysílač a přijímač laserového signálu příliš blízko u sebe. Se všemi dálkoměry byly měřeny vzdálenosti simulované LTE stanicí. Následně byly změřeny některé parametry laseru v programu Pulse Browser. Vzhledem k tomu, že LTE stanice má nefunkční postupný attenuátor, byl dosah změřen jen pro jeden dálkoměr a výsledek je velmi nepřesný. Se stejným dálkoměrem bylo provedeno i polní měření pro zjištění dosahu za využití ND filtrů. Ani toto měření nedopadlo dle očekávání. Dosah dálkoměru by měl být nezávislý na vzdálenosti která byla měřena při použití ND filtrů, ale výsledky tomu neodpovídají. Navíc u terénního měření je velmi omezená opakovatelnost měření. Pokud by byl u LTE stanice funkční postupný attenuátor, byla by LTE stanice vhodným přístrojem pro měření dosahu dálkoměrů díky jednoduchosti a rychlosti měření v porovnání s terénním měřením. Bylo ověřeno, že LTE stanici lze použít k ověření přesnosti dálkoměru a zjištění některých důležitých parametrů dálkoměru. Jen by bylo vhodné, kdyby program Pulse Browser byl přehlednější a hlavně u něj chybí možnost uložit do počítače data z nichž program vytváří graf a počítá hodnoty měřených parametrů.

Příloha A

Laserová bezpečnost

Laserové dálkoměry podléhají nařízení vlády o ochraně před neionizujícím zářením [2]. Toto nařízení rozděluje lasery do kategorií podle bezpečnosti. Důležitou roli v klasifikaci hraje výkon, význam má také divergence svazku a vlnová délka. Všechny přístroje využívající lasery musí být označeny informační tabulkou a od třídy 2 i varovnou značkou (viz obrázek A.1).



Obrázek A.1: Značka varující před laserovým zářením třídy 2 a vyšší. [17]

Třída 1

Lasery třídy 1 jsou oku zcela bezpečné při dlouhodobém vystavení a to i při pozorování optickými přístroji.

Třída 1M

Třída 1M je zcela bezpečná pro dlouhodobé pozorování okem. Spadají sem lasery s velkou divergencí svazku. Proto při fokusaci optickými přístroji může výkon dosahovat vyšší třídy a může hrozit poškození zraku.

Třída 2

Do třídy 2 spadají pouze lasery z viditelné oblasti (400 až 700 nm), protože oko chrání mrkací reflex. Potlačení mrkacího reflexu může vést k poškození oka.

Třída 2M

Analogicky s třídou 1M je i 2M bezpečná pro oko, avšak při použití optických přístrojů hrozí poškození zraku.

Třída 3R

Třída 3R je považována za bezpečnou. Dráha svazku musí být dobře značena. Hrozí riziko dočasného nebo trvalého poškození zraku při přímém pohledu do svazku. Nebezpečí závisí na délce expozice.

Třída 3B

Přímý pohled do laserového svazku třídy 3B je nebezpečný i při krátkém ozáření. Odrazy od matných předmětů jsou však bezpečné. Laser musí být vybaven bezpečnostním spínačem a při práci s ním je potřeba nosit ochranné brýle.

Třída 4

Třída 4 je nejnebezpečnější. Hrozí zde poškození zraku i při pozorování odrazů. Může způsobit popálení kůže nebo požár. Laser musí být vybaven bezpečnostním spínačem. Při práci s ním je potřeba nosit ochranné brýle a postupovat velmi opatrně.

Rizika při vystavení neionizujícímu záření

Tkáně vystavené laserovému záření na něj mohou reagovat různě. Vždy však jde o následek absorpce záření. Může jít o tepelný účinek, kdy atomy a molekuly pohlcující záření se rozkmitají a tím zvýší okolní teplotu, což může při dlouhém vystavení, v závislosti na výkonu laseru, ke vzniku popálenin. Popáleniny působí většinou kontinuální lasery a lasery s dlouhými pulzy. Při zasažení oka může dojít k popálení rohovky, sítnice a očního nervu, což může vést až k oslepnutí. Další poškození může nastat tím, že absorpce záření zapříčiní nevratné chemické procesy. K chemickým reakcím dochází

převážně při působení záření s krátkými vlnovými délkami (typicky UV). Může jít například o degeneraci rohovky. Při vystavení krátkých pulzů o vysokém výkonu může dojít k přeměně vody uvnitř buněk na vodní páru a následnému roztržení postižených buněk a poškození okolních tkání. [14]

Dle zákona [2] jsou pro laserové záření stanoveny limity v závislosti na vlnové délce a době expozice. Protože dosah dálkoměru závisí přímo na výkonu použitého laseru, je dobré volit vlnovou délku, pro kterou jsou limity vysoké. Jako vhodné se tedy nabízí rozsah 1500 - 1800 nm, do kterého spadají i dálkoměry, které byly pro tuto práci měřeny. Pro expozice až do 10 s, což zdaleka přesahuje čas potřebný pro měření, je hodnota maximální expozice $10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro ostatní vlnové délky je maximální hodnota o jeden i více řádů nižší.

Příloha B

Výsledky měření dalších dálkoměrů

B.1 Měření simulovaných vzdáleností přístrojů PLRF25C s programem MET Control

Zde jsou uvedeny další výsledky z měření simulovaných vzdáleností přístrojů PLRF25C BLE X3 číslo B171 až 181 v programu MET Control. Nastavení programu LE Control odpovídá tabulce 3.1 a programu MET Control tabulce 3.2.

Tabulka B.1: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B171.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	10000
Měření č. 1	502,0	1000,4	3001,0	5001,4	7002,4	X
2	502,1	1000,3	3000,9	5001,7	7002,1	X
3	502,2	1000,4	3000,9	5001,4	7002,2	X
4	502,1	1000,3	3000,9	5001,5	7002,1	X
5	502,1	1000,4	3000,9	5001,5	7002,5	X
6	502,2	1000,4	3001,1	5001,5	7002,4	X
7	502,0	1000,4	3000,9	5001,5	7002,5	X
8	502,1	1000,4	3001,2	5001,9	7002,1	X
9	502,1	1000,4	3000,9	5001,4	7002,0	X
10	502,1	1000,3	3000,9	5001,9	7002,0	X
Průměr	502,10	1000,37	3000,96	5001,57	7002,23	X
Směrodatná odchylka	± 0,02	± 0,02	± 0,03	± 0,06	± 0,06	X

Tabulka B.2: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B172.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,2	999,6	2999,9	5000,8	7001,1	9001,6
2	501,2	999,3	3000,1	5000,6	7001,3	9001,6
3	501,1	999,4	3000,0	5000,7	7001,3	9001,6
4	501,3	999,4	3000,1	5000,6	7001,0	9001,6
5	501,3	999,4	3000,2	5000,8	7001,1	9001,6
6	501,0	999,6	3000,0	5000,7	7001,1	9001,6
7	501,3	999,6	3000,1	5000,5	7001,1	9001,6
8	501,3	999,5	3000,0	5000,6	7001,1	9001,4
9	501,3	999,6	3000,0	5000,5	7001,1	9001,7
10	501,0	999,7	3000,1	5000,5	7001,1	9001,6
Průměr	501,2	999,51	3000,05	5000,63	7001,13	9001,59
Směrodatná odchylka	± 0,04	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,02

Tabulka B.3: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B173.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,5	999,8	2999,8	5000,3	7001,4	9001,9
2	501,5	999,2	2999,7	5000,8	7000,8	9001,9
3	501,5	999,3	2999,8	5000,8	7001,3	9001,9
4	501,5	999,3	2999,7	5000,3	7001,3	9001,9
5	501,0	999,3	2999,7	5000,3	7001,4	9001,3
6	501,5	999,3	2999,8	5000,9	7001,4	9001,9
7	501,6	999,3	2999,7	5000,8	7001,4	9001,4
8	501,1	999,8	2999,7	5000,4	7000,9	9001,4
9	501,5	999,3	2999,7	5000,8	7001,4	9001,3
10	501,5	999,2	2999,7	5000,9	7001,3	9001,9
Průměr	501,42	999,38	2999,73	5000,63	7001,26	9001,68
Směrodatná odchylka	± 0,06	± 0,07	± 0,02	± 0,08	± 0,07	± 0,09

Tabulka B.4: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B174.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,9	1000,1	3000,6	5000,8	7001,3	9001,9
2	501,9	1000,1	3000,2	5000,7	7001,4	9001,9
3	501,9	999,7	3000,6	5001,2	7001,4	9001,9
4	501,9	1000,1	3000,6	5000,8	7001,3	9001,9
5	501,9	1000,1	3000,6	5000,8	7001,4	9001,9
6	501,9	999,7	3000,7	5000,7	7001,4	9001,9
7	501,9	1000,1	3000,6	5000,8	7001,3	9001,9
8	501,8	1000,1	3000,6	5000,8	7001,4	9001,9
9	501,9	999,8	3000,6	5000,8	7001,3	9002,0
10	501,5	999,7	3000,6	5000,9	7001,4	9001,9
Průměr	501,85	999,95	3000,57	5000,83	7001,36	9001,91
Směrodatná odchylka	± 0,04	± 0,06	± 0,04	± 0,04	± 0,02	± 0,01

Tabulka B.5: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B175.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,4	999,8	3000,4	5001,0	7001,6	9002,1
2	501,5	999,8	3000,4	5001,0	7001,6	9002,1
3	501,5	999,7	3000,4	5001,0	7001,6	9002,1
4	501,4	999,8	3000,5	5000,9	7001,6	9002,2
5	501,4	999,8	3000,4	5001,0	7001,6	9002,1
6	501,5	999,8	3000,4	5001,0	7001,6	9002,2
7	501,5	999,9	3000,4	5001,0	7001,6	9002,1
8	501,5	1000,0	3000,3	5001,0	7001,6	9002,1
9	501,5	999,8	3000,4	5001,0	7001,6	9002,1
10	501,5	999,8	3000,4	5001,0	7001,6	9002,0
Průměr	501,47	999,82	3000,4	5000,99	7001,6	9002,11
Směrodatná odchylka	± 0,02	± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0	± 0,02

Tabulka B.6: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B176.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,4	999,2	2999,8	5000,8	7000,9	9001,9
2	501,4	999,6	2999,7	5000,8	7001,3	9001,9
3	501,4	999,2	3000,2	5000,8	7000,9	9001,4
4	501,0	999,7	2999,8	5000,8	7000,9	9001,5
5	501,0	999,6	3000,2	4998,9	7001,3	9002,0
6	501,4	999,2	3000,2	5000,8	7001,3	9001,9
7	501,0	999,7	2999,8	5000,3	7000,9	9001,4
8	501,4	999,6	3000,3	5000,8	7001,4	9001,4
9	501,4	999,2	3000,2	5000,8	7001,4	9001,9
10	501,4	999,7	3000,2	5000,2	7001,4	9001,4
Průměr	501,28	999,47	3000,04	5000,5	7001,17	9001,67
Směrodatná odchylka	± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,2	± 0,07	± 0,08

Tabulka B.7: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B177.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	502,0	1000,2	3000,8	5000,9	7002,1	9002,4
2	502,0	1000,2	3000,8	5001,3	7001,6	9002,4
3	502,0	1000,2	3000,7	5001,3	7001,9	9002,1
4	502,0	1000,2	3000,4	5001,1	7002,2	9002,4
5	502,0	1000,2	3000,8	5001,1	7002,4	9002,4
6	502,0	1000,2	3000,7	5001,0	7002,1	9002,4
7	502,0	1000,2	3000,8	5001,3	7001,9	9002,4
8	502,0	1000,2	3000,7	5001,1	7001,9	9002,4
9	502,0	999,9	3000,5	5001,3	7001,9	9002,4
10	502,0	1000,2	3000,7	5001,0	7001,9	9002,4
Průměr	502	1000,17	3000,69	5001,14	7001,99	9002,37
Směrodatná odchylka	± 0	± 0,03	± 0,04	± 0,05	± 0,07	± 0,03

Tabulka B.8: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B178.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,2	999,5	3000,0	5000,5	7001,6	9001,7
2	501,2	999,5	3000,0	5001,0	7001,7	9001,6
3	501,3	999,5	3000,0	5001,0	7001,6	9002,2
4	501,2	999,4	3000,1	5001,0	7001,6	9002,1
5	501,2	999,4	3000,5	5001,1	7001,6	9002,1
6	501,2	999,5	3000,0	5001,1	7001,6	9001,7
7	501,2	999,5	3000,5	5000,6	7001,1	9002,2
8	501,2	999,5	3000,0	5001,0	7001,0	9002,2
9	501,2	999,4	3000,0	5000,5	7001,1	9002,1
10	501,3	999,5	2999,9	5001,0	7001,6	9001,6
Průměr	501,22	999,47	3000,1	5000,88	7001,45	9001,95
Směrodatná odchylka	± 0,01	± 0,02	± 0,07	± 0,08	± 0,08	± 0,08

Tabulka B.9: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B179.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	502,2	1000,4	3000,9	5001,4	7002,0	9002,6
2	502,1	1000,3	3000,9	5001,4	7002,0	9002,5
3	501,7	1000,5	3000,9	5001,4	7001,9	9002,5
4	502,1	1000,4	3001,0	5001,4	7001,5	9002,4
5	502,2	1000,4	3000,9	5001,5	7001,9	9002,5
6	502,2	1000,4	3000,9	5001,4	7002,0	9002,5
7	502,2	1000,4	3001,0	5001,5	7002,0	9002,5
8	502,1	1000,4	3000,9	5001,4	7001,9	9002,5
9	502,2	1000,4	3000,9	5001,4	7002,0	9002,5
10	502,2	1000,4	3000,9	5001,5	7002,0	9002,6
Průměr	502,12	1000,40	3000,92	5001,43	7001,92	9002,51
Směrodatná odchylka	± 0,05	± 0,01	± 0,01	± 0,02	± 0,05	± 0,02

Tabulka B.10: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B180.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,9	999,7	3000,7	5001,3	7001,8	9001,9
2	501,4	999,6	3000,7	5001,3	7001,9	9001,8
3	501,4	1000,2	3000,7	5001,2	7001,8	9001,8
4	501,3	1000,2	3000,7	5001,3	7001,3	9002,4
5	501,9	999,6	3000,7	5001,2	7001,8	9002,3
6	502,0	1000,2	3000,7	5001,3	7001,3	9001,8
7	501,9	999,6	3000,7	5001,3	7001,8	9001,8
8	501,9	1000,2	3000,2	5001,3	7001,3	9001,9
9	501,3	1000,2	3000,1	5001,2	7001,9	9001,9
10	501,3	1000,2	3000,7	5001,3	7001,3	9002,4
Průměr	501,6	999,97	3000,59	5001,27	7001,62	9002,0
Směrodatná odchylka	± 0,1	± 0,09	± 0,07	± 0,02	± 0,09	± 0,08

Tabulka B.11: Měření simulovaných vzdáleností přístroje PLRF25C B181.

Simulovaná vzdálenost [m]	500	1000	3000	5000	7000	9000
Měření č. 1	501,2	999,6	3000,2	5000,8	7001,3	9001,9
2	501,3	1000,1	3000,2	5000,7	7001,3	9001,8
3	501,8	999,6	3000,2	5000,8	7001,3	9001,8
4	501,8	1000,1	3000,7	5000,6	7001,4	9001,8
5	501,3	999,6	3000,1	5000,8	7001,8	9001,8
6	501,3	999,6	3000,1	5000,7	7001,3	9001,8
7	501,9	999,6	3000,2	5001,2	7001,3	9001,8
8	501,4	999,7	3000,7	5000,7	7001,2	9001,8
9	501,8	999,6	3000,6	5000,8	7001,4	9001,8
10	501,8	997,9	3000,3	5000,7	7001,3	9001,9
Průměr	501,56	999,5	3000,33	5000,78	7001,36	9001,82
Směrodatná odchylka	± 0,09	± 0,2	± 0,08	± 0,05	± 0,05	± 0,01

B.2 Měření parametrů dálkoměrů PLRF25C v programu Pulse Browser

V této části jsou výsledky měření parametrů přístrojů PLRF25C BLE X3 číslo B171 až B181 v programu Pulse Browser. Nastavení programu LE Control pro měření s Pulse Browser odpovídá tabulce 3.4 a nastavení programu Pulse Browser odpovídá tabulce 3.5. S každým přístrojem byla provedena tři měření.

Tabulka B.12: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B171.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	17,6	21,6	19,2	0,594
	2	16,4	19,9	18,3	0,852
	3	16,6	20,3	18,7	0,747
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	189	6,15
	2	176	192	182	7,79
	3	176	192	182	7,62
Energie pulzu [μ J]	1	3,43	3,89	3,64	0,0675
	2	3,15	3,54	3,33	0,0625
	3	3,18	3,64	3,39	0,0669
Perioda [ms]	1	0,101	6,400	0,119	0,207
	2	0,101	6,450	0,119	0,206
	3	0,101	6,410	0,119	0,207
Počet pulzů	1	-	-	3071	-
	2	-	-	3072	-
	3	-	-	3071	-

Tabulka B.13: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B172.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	19,0	24,6	21,2	0,797
	2	19,2	24,6	21,8	0,922
	3	18,7	22,3	21,0	0,639
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	197	7,64
	2	176	208	193	8,14
	3	176	208	194	5,59
Energie pulzu [μ J]	1	3,85	4,33	4,17	0,0680
	2	3,72	4,34	4,22	0,0411
	3	3,63	4,24	4,08	0,0674
Perioda [ms]	1	0,101	6,510	0,119	0,210
	2	0,101	6,440	0,119	0,208
	3	0,101	6,510	0,119	0,208
Počet pulzů	1	-	-	2940	-
	2	-	-	2941	-
	3	-	-	2941	-

Tabulka B.14: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B173.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	18,1	23,4	21,2	0,474
	2	19,5	23,2	21,4	0,593
	3	19,2	23,1	21,3	0,468
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	192	4,23
	2	176	208	194	5,58
	3	176	208	192	4,06
Energie pulzu [μ J]	1	3,76	4,18	4,07	0,0417
	2	3,82	4,30	4,16	0,0459
	3	3,74	4,24	4,09	0,0487
Perioda [ms]	1	0,101	6,470	0,119	0,206
	2	0,101	6,400	0,119	0,206
	3	0,101	6,430	0,118	0,205
Počet pulzů	1	-	-	2911	-
	2	-	-	2911	-
	3	-	-	2911	-

Tabulka B.15: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B174.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	14,0	17,6	15,6	0,455
	2	17,3	21,1	19,3	0,404
	3	17,3	22,0	19,3	0,617
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	191	5,19
	2	176	208	192	3,80
	3	176	208	191	5,60
Energie pulzu [μ J]	1	2,85	3,13	2,99	0,0477
	2	3,06	3,80	3,70	0,0428
	3	3,27	3,95	3,69	0,0835
Perioda [ms]	1	0,101	6,520	0,119	0,208
	2	0,101	6,480	0,119	0,207
	3	0,101	6,510	0,119	0,207
Počet pulzů	1	-	-	3071	-
	2	-	-	3072	-
	3	-	-	3072	-

Tabulka B.16: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B175.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	20,0	25,1	22,4	0,687
	2	19,7	25,1	22,6	0,638
	3	19,7	24,9	22,4	0,858
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	192	5,44
	2	176	208	190	5,20
	3	176	208	190	7,05
Energie pulzu [μ J]	1	3,96	4,45	4,30	0,0455
	2	3,80	4,45	4,30	0,0499
	3	3,86	4,38	4,26	0,0457
Perioda [ms]	1	0,101	6,510	0,119	0,212
	2	0,101	6,380	0,119	0,210
	3	0,101	6,500	0,119	0,210
Počet pulzů	1	-	-	2986	-
	2	-	-	2987	-
	3	-	-	2987	-

Tabulka B.17: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B176.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	17,8	22,3	20,6	0,82
	2	17,6	22,0	19,7	0,67
	3	17,3	21,0	19,0	0,616
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	190	7,59
	2	176	208	193	5,89
	3	176	208	190	6,10
Energie pulzu [μ J]	1	3,42	4,02	3,91	0,0428
	2	3,50	3,93	3,79	0,0407
	3	3,35	3,82	3,60	0,0837
Perioda [ms]	1	0,101	6,560	0,120	0,216
	2	0,101	6,520	0,119	0,215
	3	0,101	6,550	0,119	0,215
Počet pulzů	1	-	-	3050	-
	2	-	-	3050	-
	3	-	-	3050	-

Tabulka B.18: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B177.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	19,4	23,2	21,1	0,713
	2	17,0	22,4	20,7	0,825
	3	18,4	22,7	20,6	0,908
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	188	6,90
	2	176	192	183	7,96
	3	176	192	184	8,00
Energie pulzu [μ J]	1	3,73	4,26	3,97	0,0840
	2	3,00	3,99	3,79	0,0678
	3	3,53	4,05	3,79	0,0817
Perioda [ms]	1	0,101	6,450	0,119	0,207
	2	0,101	6,480	0,119	0,206
	3	0,101	6,470	0,119	0,206
Počet pulzů	1	-	-	3055	-
	2	-	-	3056	-
	3	-	-	3056	-

Tabulka B.19: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B178.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	18,0	23,0	19,8	0,860
	2	17,1	22,6	19,4	0,717
	3	18,3	23,7	21,1	0,642
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	198	8,02
	2	176	208	196	7,32
	3	176	208	192	5,52
Energie pulzu [μ J]	1	3,75	4,13	3,91	0,0698
	2	3,40	3,99	3,80	0,0846
	3	3,77	4,31	4,04	0,0874
Perioda [ms]	1	0,101	6,420	0,119	0,207
	2	0,101	6,530	0,119	0,207
	3	0,101	6,510	0,119	0,207
Počet pulzů	1	-	-	3060	-
	2	-	-	3061	-
	3	-	-	3061	-

Tabulka B.20: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B179.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	17,4	22,1	19,4	0,546
	2	17,8	21,9	19,8	0,830
	3	17,9	22,3	20,3	0,922
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	192	4,94
	2	176	208	188	6,88
	3	176	208	186	7,81
Energie pulzu [μ J]	1	3,50	3,93	3,73	0,0663
	2	3,47	3,90	3,72	0,0678
	3	3,35	3,95	3,76	0,0730
Perioda [ms]	1	0,101	6,45	0,119	0,208
	2	0,101	6,49	0,119	0,207
	3	0,101	6,58	0,119	0,207
Počet pulzů	1	-	-	3071	-
	2	-	-	3072	-
	3	-	-	3072	-

Tabulka B.21: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B180.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	22,8	28,7	25,7	0,841
	2	21,5	28,2	25,6	0,870
	3	18,8	25,7	22,0	1,17
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	191	5,17
	2	176	208	189	6,05
	3	176	208	189	6,46
Energie pulzu [μ J]	1	4,53	5,16	4,91	0,1040
	2	4,13	5,11	4,85	0,0983
	3	3,76	4,60	4,17	0,1740
Perioda [ms]	1	0,101	6,510	0,119	0,211
	2	0,101	6,460	0,119	0,210
	3	0,101	6,460	0,119	0,209
Počet pulzů	1	-	-	3045	-
	2	-	-	3045	-
	3	-	-	3045	-

Tabulka B.22: Měření parametrů dálkoměru PLRF25C B181.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	17,5	23,2	20,8	0,867
	2	17,7	24,2	21,5	0,803
	3	22,7	27,7	25,2	1,080
Šířka pulzu [ns]	1	176	208	190	6,31
	2	176	208	188	6,76
	3	176	192	186	7,72
Energie pulzu [μ J]	1	3,54	4,21	3,95	0,1230
	2	3,40	4,29	4,04	0,0836
	3	4,09	4,96	4,68	0,1040
Perioda [ms]	1	0,101	6,640	0,120	0,218
	2	0,101	6,630	0,120	0,217
	3	0,101	6,600	0,119	0,215
Počet pulzů	1	-	-	3071	-
	2	-	-	3072	-
	3	-	-	3072	-

B.3 Měření simulovaných vzdáleností přístrojů Moskito TI+ s programem MET Control

Následující tabulky zobrazují výsledky měření simulovaných vzdáleností přístrojů Moskito TI+. Přístroje číslo V.112.122 a V.112.113 byly měřeny ve stejném rozsahu jako přístroj V.112.111 uvedený v hlavní části této práce. Čísla V.112.114 až V.112.119 byla měřena jen pro tři simulované vzdálenosti s menším počtem opakování. Šlo o ověření funkčnosti, před předáním zákazníkovi, proto s nimi nebyla prováděna ani žádná další měření. Nastavení programu LE Control pro měření simulace vzdáleností odpovídá tabulce 3.10 a nastavení programu MET Control odpovídá tabulce 3.11.

Tabulka B.23: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.114.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	5000	10000
Měření č. 1	1000	5001	10003
2	1000	5001	10003
3	1000	5001	10003
4	1000	5001	10003
5	1000	5001	10003
Průměr	1000	5001	10003
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	± 0

Tabulka B.24: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.115.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	5000	10000
Měření č. 1	1000	5001	10002
2	999	5001	10002
3	1000	5001	10002
4	999	5001	10002
5	1000	5001	10002
Průměr	999,6	5001	10002
Směrodatná odchylka	$\pm 0,2$	± 0	± 0

Tabulka B.25: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.116.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	5000	10000
Měření č. 1	1001	5002	10003
2	1001	5002	10003
3	1001	5002	10003
4	1001	5002	10003
5	1001	5002	10003
Průměr	1001	5002	10003
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	± 0

Tabulka B.26: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.117.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	5000	10000
Měření č. 1	1001	5002	10003
2	1001	5002	10003
3	1001	5002	10003
4	1001	5002	10003
5	1001	5002	10003
Průměr	1001	5002	10003
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	± 0

Tabulka B.27: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.118.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	5000	10000
Měření č. 1	999	5000	10002
2	999	5000	10002
3	999	5000	10002
4	999	5000	10002
5	999	5000	10002
Průměr	999	5000	10002
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	± 0

Tabulka B.28: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.119.

Simulovaná vzdálenost [m]	1000	5000	10000
Měření č. 1	999	5001	10002
2	1000	5001	10002
3	999	5001	10002
4	999	5001	10002
5	999	5001	10002
Průměr	999,2	5001,	10002
Směrodatná odchylka	$\pm 0,2$	± 0	± 0

Tabulka B.29: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.112.

Simulovaná vzdálenost [m]	200	500	1000	5000	10000
Měření č. 1	199	501	999	5000	10002
2	199	501	999	5000	10002
3	199	501	999	5000	10002
4	199	501	999	5000	10002
5	199	501	999	5000	10002
6	199	501	999	5000	10002
7	199	501	999	5000	10002
8	199	501	999	5000	10002
9	199	501	999	5000	10002
10	199	501	999	5000	10002
Průměr	199	501	999	5000	10002
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0

Tabulka B.30: Měření simulovaných vzdáleností přístroje Moskito TI+ V.112.113.

Simulovaná vzdálenost [m]	200	500	1000	5000	10000
Měření č. 1	199	501	999	5000	10002
2	199	501	999	5000	10002
3	199	501	999	5001	10002
4	199	501	999	5001	10002
5	199	501	999	5001	10002
6	199	501	999	5000	10002
7	199	501	999	5000	10002
8	199	501	999	5000	10002
9	199	501	1000	5001	10002
10	199	501	1000	5001	10002
Průměr	199	501	999,2	5000,5	10002
Směrodatná odchylka	± 0	± 0	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	± 0

B.4 Měření parametrů dálkoměrů Moskito TI+ v programu Pulse Browser

V této poslední části se nachází výsledky měření parametrů přístrojů Moskito TI+ číslo V.112.112 a V.112.113 v programu Pulse Browser. Měření pro každý přístroj bylo provedeno třikrát. Nastavení programu LE Control pro měření s programem Pulse Browser odpovídá tabulce 3.13 a nastavení programu Pulse Browser odpovídá tabulce 3.14.

Tabulka B.31: Měření parametrů dálkoměru Moskito TI+ V.112.112.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	82,5	360,0	201,0	88,6
	2	50,4	366,0	178,0	82,0
	3	48,5	340,0	163,0	79,4
Šířka pulzu [ns]	1	16,0	48,0	27,9	10,3
	2	16,0	48,0	28,0	10,2
	3	16,0	48,0	28,2	10,4
Energie pulzu [μ J]	1	3,07	6,13	4,79	0,665
	2	1,61	7,09	4,28	1,06
	3	1,55	5,49	3,90	0,821
Perioda [ms]	1	0,20	1,84	0,218	0,161
	2	0,20	1,84	0,218	0,159
	3	0,20	1,80	0,218	0,161
Počet pulzů	1	-	-	1388	-
	2	-	-	1388	-
	3	-	-	1388	-

Tabulka B.32: Měření parametrů dálkoměru Moskito TI+ V.112.113.

Parametr	Měření č.	Min.	Max.	Průměr	Směrodatná odchylka
Výkon pulzu [W]	1	96,9	365,0	160,0	25,7
	2	49,1	336,0	146,0	41,2
	3	62,3	337,0	150,0	59,8
Šířka pulzu [ns]	1	16,0	48,0	34,0	5,55
	2	16,0	48,0	33,5	6,7
	3	16,0	48,0	32,4	8,22
Energie pulzu [μ J]	1	3,10	6,97	5,38	0,677
	2	1,57	6,28	4,68	0,719
	3	1,99	5,79	4,43	0,596
Perioda [ms]	1	0,20	1,91	0,219	0,171
	2	0,20	1,92	0,219	0,172
	3	0,20	1,91	0,219	0,171
Počet pulzů	1	-	-	1402	-
	2	-	-	1402	-
	3	-	-	1402	-

Literatura

- [1] HORÁK, Richard. Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů. Olomouc: Chlup.net, 2012. ISBN 978-80-903958-6-2.
- [2] Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, Sbírka zákonů č. **291**/2015.
- [3] MUZAL, Michał a ZYGMUNT, Marek. Analysis of the Impact of Changes in Echo Signal Parameters on the Uncertainty of Distance Measurements in p-ToF Laser Rangefinders. Online. Sensors (14248220). 2022, roč. 22, č. 16, s. 5973-5986. ISSN 14248220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22165973>.
- [4] Wojtanowski, Jacek & Zygmunt, Marek & Kaszczuk, Mirosława & Mierczyk, Zygmunt & Muzal, Michał. (2014). Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions. Opto-Electronics Review. 22. 10.2478/s11772-014-0190-2.
- [5] ANDREWS, Larry C. Field guide to atmospheric optics. Bellingham: SPIE Press, 2004. ISBN 0-8194-5318-8.
- [6] Uživatelská příručka k přístroji Moskito TI: Safran-Vectronix_Moskito-TI_User-Manual_2022-09_version-F
- [7] Uživatelská příručka k přístroji PLRF25C BLE X3: Safran-Vectronix_PLRF25C BLE X3_User-Manual_2022-11_version-C
- [8] Uživatelská příručka k přístroji JIM Compact: Safran_JIM Compact_Návod k obsluze a údržbě_2022-09_CZE_PRAMACOM-HT, spol. s r.o.
- [9] LTE Station for testing laser range finders/designators, dostupné online: https://www.inframet.com/Data_sheets/LTE.pdf

- [10] Postup měření laserových dálkoměrů na LTE stanici, OPT_LTE.01/2022, vydání 1., PRAMACOM-HT, spol. s r.o.
- [11] SUN Bin, WANG Xiao-bing, LIN Yi, WAN Qiang, LU Chang-yong, Guo Yan-long. Range-finding capability of laser range finder by extinction-ratio measurement without target, LASER TECHNOLOGY, 2004,28(1):82-84,87.
- [12] Unmounted NIR Absorptive ND Filters, dostupné online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5559
- [13] Laser safety - Wikipedia, dostupné online: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety
- [14] Ochrana zdraví při práci s lasery. Bozp.info. (2011, September 26), dostupné online: <https://www.bozpinfo.cz/ochrana-zdravi-pri-praci-s-lasery?page=0%2C2>

Obrázky

- [15] Problematika dosahu OE přístrojů v reálných atmosférických podmínkách, dostupné online: <https://docplayer.cz/37160795-Problematika-dosahu-oe-pristroju-v-realnych-atmosferickych-podminkach.html>
- [16] CHRZANOWSKI, Krzysztof. Stations for testing laser range finder, OPTRO-2014-2951830 OECD CONFERENCE CENTER, PARIS, FRANCE / 28-30 JANUARY 2014.
- [17] Varovná značka pro třídu 2 a vyšší, dostupné online: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety#/media/File:Laser-symbol.svg

