



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**ZOBRAZENÍ BINÁRNÍCH MASEK POMOCÍ DMD
ČIPU**

BINARY MASKS DLP WITH DMD CHIP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Filip

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Jakub Filip
Studijní program:	Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zobrazení binárních masek pomocí DMD čipu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

DMD (Digital Micromirror Device) čipy, které jsou základem pro digitální zpracování světla (DLP – Digital Light Processing), jsou v dnešní době nedílnou součástí mnoha moderních optických zařízení. Jedná se o pole mikrozrcátek, jejichž naklonění lze vysokorychlostně řídit, a tak vytvářet binární odrazivé masky. Své uplatnění nalézají především v zobrazovací a osvětlovací technice (projektory, 3D litografické tiskárny atd.). Kromě toho jsou v dnešní době využívány pro vědecké účely k digitálnímu vytváření difrakčních prvků a masek pro strukturované osvětlení.

K plnému využití rychlosti DMD čipů je nutné zvládnout jejich řízení. Zakoupený DLP vývojový kit (DLP® LightCrafter™ 9000 Evaluation Module) umožňuje několik módů řízení. V současné době je v laboratoři využíváno video–módu s rychlostí zobrazení cca 60 Hz. Tato rychlost se vzhledem k plánovaným aplikacím projevuje jako nedostatečná. Proto je nutno využít módu pro projekci binárních masek, který má umožnit rychlost až 9.5 kHz.

Cíle diplomové práce:

- provést rešerši řízení DMD čipů / DLP systémů,
- provést testování rychlosti zobrazení binárních masek s využitím SW výrobce,
- využít SDK dodané výrobcem a v jazyce Python vytvořit knihovnu pro vysokorychlostní zobrazení binárních masek,
- vytvořit vzorovou aplikaci v jazyce Python.

Seznam doporučené literatury:

TEXAS INSTRUMENTS, DLP™ System Optics, Application Report, July 2010 [online; 30. 5. 2019]. <http://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf>

TEXAS INSTRUMENTS, DLP® LightCrafter™ 6500 and 9000 Evaluation Module (EVM) User's Guide, March 2019, [online] <https://www.ti.com/lit/ug/dlpu028d/dlpu028d.pdf>

TEXAS INSTRUMENTS, DLPC900 Programmer's Guide, September 2017, [online]
<http://www.ti.com/lit/ug/dlpu018d/dlpu018d.pdf>

LUTZ, Mark. Learning Python. 5th Edition. O'Reilly Media, 2013. ISBN 978-1449355739.

PyUSB 1.0: Easy USB access from Python [online]. [cit. 2021-10-21]. Dostupné z:
<https://github.com/pyusb/pyusb>

Python 3 documentation: struct — Interpret bytes as packed binary data [online]. [cit. 2021-10-21].
Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/struct.html>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je vytvoření knihovny v programovacím jazyce Python, která je schopna řídit vyhodnocovacím modul DLP LightCrafter 9000 EVM. Prostřednictvím této knihovny má být docíleno potenciálu zakoupeného modulu v oblasti vysokorychlostního zobrazování binárních masek. Teoretická část diplomové práce pojednává o technologii a hardwaru DLP. Vlastnosti hardwaru jsou blíže specifikovány s ohledem na zakoupený modul. Další kapitoly se zaměřují na příkazové řídicí rozhraní a GUI aplikaci, které poskytují dodatečné informace nejen o způsobu komunikace mezi modulem a PC, ale i o podmínkách pro dosažení požadovaných výstupů. Praktická část se zabývá analýzou komunikace mezi modulem a PC, zpracováním digitálních obrazových dat a implementací knihovny v programovacím jazyce Python.

ABSTRACT

The diploma thesis aims to create a library in the Python programming language, which can control the DLP LightCrafter 9000 EVM evaluation module. Through this library, the potential of the purchased module in the field of high-speed imaging of binary masks should be achieved. The theoretical part of the thesis deals with DLP technology and hardware. The hardware properties are specified in more detail with respect to the purchased module. The following chapters focus on the command control interface and the GUI application, which provide additional information not only about the method of communication between the module and the PC but also about the conditions for achieving the desired outputs. The practical part deals with the analysis of communication between the module and the PC, the processing of digital image data, and the implementation of the library in the Python programming language.

KLÍČOVÁ SLOVA

DLP, DMD, Digitální mikrozrcadlové zařízení, DLPLCR9000EVM, DLP LightCrafter 9000 EVM, DLPC900, DLP9000, USB, I²C, binární masky, vysokorychlostní zobrazování binárních masek, Python

KEYWORDS

DLP, DMD, Digital Micromirror, DLPLCR9000EVM, DLP LightCrafter 9000 EVM, DLPC900, DLP9000, USB, I²C, Binary Masks, High Speed Binary Mask Imaging, Python.



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FILIP, Jakub. *Zobrazení binárních masek pomocí DMD čipu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145642> . Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce: doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování směřuje mému blízkému okolí, které mi bylo oporou. Zároveň bych chtěl poděkovat konzultantovi diplomové práce panu Ing. Zbyňku Dostálovi, Ph.D., který mi poskytl opakovaný přístup do laboratoře, kde se nachází vyhodnocovací modul, který je objektem zájmu této diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2023

.....

Jakub Filip

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	TECHNOLOGIE A HARDWARE DLP	17
2.1	Technologie DLP	17
2.1.1	DMD čip	18
2.2	Hardware DLP	19
2.2.1	Digitální řídicí jednotka DLPC900 pro pokročilé řízení osvětlení.....	20
2.2.2	Digitální mikrozrcadlové zařízení DLP9000 s vysokým rozlišením.....	24
2.2.3	Vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM	25
3	PŘÍKAZOVÉ ŘÍDICÍ ROZHRANÍ.....	31
3.1	I ² C	31
3.1.1	Transakční struktura I ² C	31
3.1.2	Příklad sekvence příkazů I ² C pro čtení.....	32
3.1.3	Příklad sekvence příkazů I ² C pro zápis	34
3.2	USB	34
3.2.1	Transakční struktura USB	34
3.2.2	Příklad transakční sekvence USB pro čtení.....	36
3.2.3	Příklad transakční sekvence USB pro zápis	37
4	SADA FIRMWARU A SOFTWARE	39
4.1	Aplikace DLP LightCrafter DLPC900 GUI.....	40
4.1.1	Společné ovládací prvky systému.....	41
4.1.2	Režimy provozu.....	41
4.1.3	Typ připojeného DMD	42
4.1.4	Stavové indikátory řadiče	42
4.1.5	Panel nastavení systému	44
4.1.6	Panel režimu videa.....	45
4.1.7	Panel režimu vzoru	48
4.1.8	Panel sekvence dávkových příkazů	51
4.1.9	Panel periferních zařízení	53
4.1.10	Panel firmwaru	54
5	ANALÝZA PROBLEMATIKY	55
5.1	Analýza komunikace mezi modulem a hostitelským PC	55
5.2	Zpracování obrazových dat binárních masek	57
5.2.1	Převod binárních masek do 24bitového RGB obrázku.....	58
5.2.2	Metody komprese 24bitového RGB obrázku	59
5.2.3	Formát odesílaných obrazových dat	61
6	PYTHON KNIHOVNA.....	63
6.1	Instalace knihovny	63

6.2	Vzorová aplikace vysokorychlostního zobrazení binárních masek	64
7	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM PŘÍLOH	69
	PŘÍLOHA A. CD-ROM	71

1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je vytvoření knihovny v programovacím jazyce Python, která umožňuje řízení vyhodnocovacího modulu DLP LightCrafter 9000 EVM. Zajištěním propojení mezi hostitelským PC a modulem lze získat přístup k příkazovému řídicímu rozhraní modulu. Přístup k tomuto příkazovému řídicímu rozhraní umožňuje plnohodnotnou kontrolu nad modulem, díky které lze využít schopnosti modulu pro vysokorychlostní zobrazování binárních masek.

Úvod práce je zaměřený na popis technologie DLP, především na elektrickomechanické a optomechanické podstatě hardwarových komponent, na jejichž základě dochází k převedení digitálních obrazových dat do podoby strukturovaného světla. V závislosti na typu použitého hardwaru jsou dosažitelné různé výsledky v oblasti vysokorychlostní zobrazování binárních masek, při aplikacích se strukturovaným světlem. Z tohoto důvodu jsou rozebrány technické specifikace, ale také i limitace dvou hlavních hardwarových komponent, ze kterých se použitý modul skládá.

Principy příkazového řídicího rozhraní definují nejenom příkazy a jejich definice, ale také i podmínky, na základě kterých je umožněna spolehlivá komunikace mezi modulem a PC. Další část práce se zabývá výše zmíněnými podmínkami, mezi které patří např. požadovaná struktura odesílaných dat, pořadí souvisejících příkazů a principy čtení a zápisu dat z modulu a do něj.

Poslední kapitola teoretické části práce představuje aplikaci GUI poskytovanou výrobcem pro ovládání modulu. Znalost práce s touto aplikací rozšiřuje informace o fungování modulu, zároveň umožňuje vytvářet testovací příklady pro následnou verifikaci správné implementace vytvořené knihovny.

Praktická část integruje výše zmíněné znalosti do podoby, která poskytuje dostatečný informační základ pro návrh a implementaci knihovny, která je schopná provádět řízení modulu za účelem dosažení vyšších rychlostí zobrazování binárních masek, než kterých bylo dosud dosaženo.

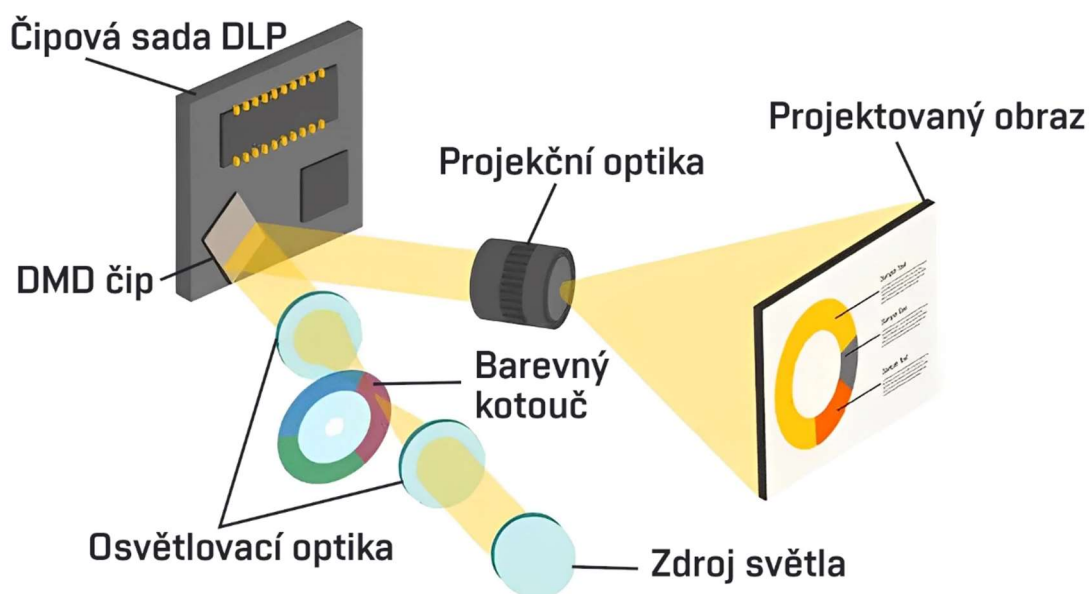
2 TECHNOLOGIE A HARDWARE DLP

V laboratoři Ústavu fyzikálního inženýrství VUT FSI v Brně je přítomen vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM (Evaluation Module). Jedná se o vysoce výkonnou a flexibilní vývojovou sadu pro začlenění technologie DLP do nejrůznějších aplikací řízení světla.

V rámci této kapitoly je představena technologie DLP v návaznosti na dostupný vyhodnocovací modul, zejména na přítomnou řídicí jednotku a digitální mikrozrcadlové zařízení DMD (Digital Micromirror Device) – kombinace řídicí jednotky a čipu DMD specifikuje vlastnosti a podporované zobrazovací aplikace, kterými jsou definovány postupy a limity při řízení vyhodnocovacího modulu.

2.1 Technologie DLP

Technologie DLP je založena na DMD, což je soustava individuálně adresovatelných vysoce reflexních hliníkových mikrozrcadel. DMD umožňuje vývojářům provádět vysokorychlostní, účinnou a spolehlivou prostorovou modulaci světla SLM (Spatial Light Modulator), a to až díky 8 milionům individuálně řízených mikrozrcadel postavených na přidružené paměťové buňce CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) [1].



Obr. 1: Příklad systému využívajícího technologii DLP (převzato a upraveno) [2]

Prostorová modulace světla s využitím individuálně řízených/adresovatelných mikrozrcadel slouží k vytvoření projektovaného/promítaného obrazu (viz Obr. 1). Promítaný obraz je vytvořen kombinací digitálních obrazových dat, zdroje světla a projekční optiky. Tato technologie může být použita prakticky s jakýmkoli typem osvětlení, např. lampy, LED světla, lasery. Zároveň je DMD schopno prostorově

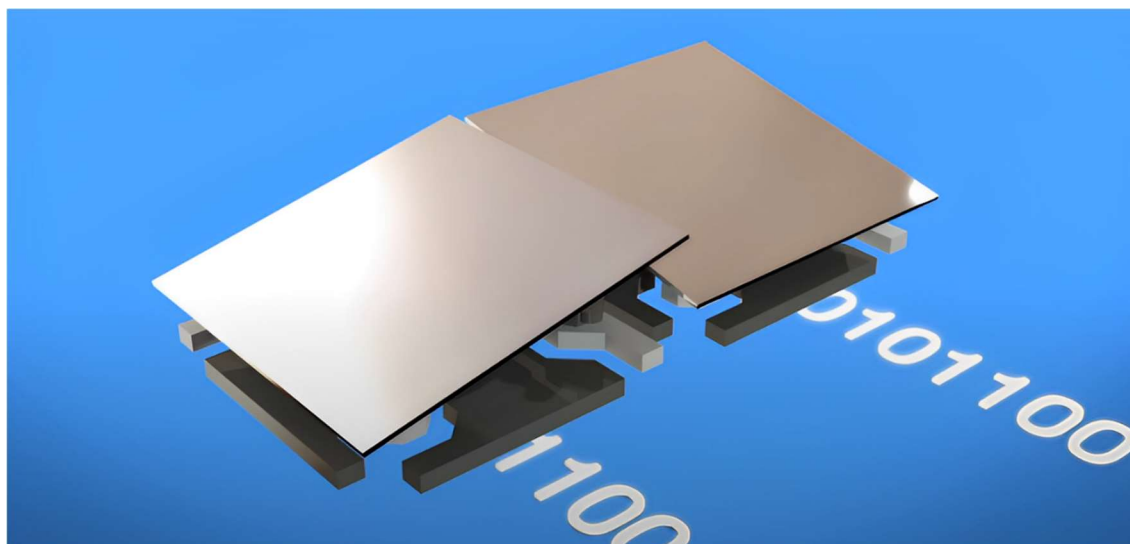
modulovat, resp. prostorově řídit/směrovat mnoho typů světla, a to od infračerveného přes viditelné až po ultrafialové.

Každé mikrozrcadlo je schopno vychylovat zdroj světla dvěma směry. Vychýlením světla směrem k projekční optice je zobrazen bílý pixel, zatímco vychýlením směrem k pohlcovači světla je zobrazen černý pixel. Stupně šedi jsou určeny dobou, po kterou je světlo směřováno k projekční optice během každého snímku. Barva do promítaného obrazu je vnesena barevným kotoučem, barevnými LED světly nebo lasery [3].

2.1.1 DMD čip

DMD je optický mikro-elektricko-mechanický systém MEMS (Micro-Electrical-Mechanical System), tzn. mikrozrcadla jsou optomechanickými i elektromechanickými prvky čipu DMD. Mikrozrcadlo je elektromechanickým prvkem v tom smyslu, že existují dva stabilní stavy mikrozrcadla ($\pm 12^\circ$ u většiny současných DMD), které jsou určeny geometrií a elektrostatikou mikrozrcadla během provozu. Mikrozrcadlo je optomechanickým prvkem v tom smyslu, že tyto dvě polohy mikrozrcadla určují směr, kterým je světlo vychýleno.

DMD je bistabilní prostorový modulátor světla, který se skládá ze soustavy pohyblivých mikrozrcadel funkčně umístěných nad paměťovou buňkou CMOS. Každé mikrozrcadlo je nezávisle řízeno načtením dat do paměťové buňky pod mikrozrcadlem tak, aby usměrňovalo odražené světlo a prostorově mapovalo pixel z dat videa na pixel na displeji. Data elektrostaticky řídí úhel sklonu zrcadla binárním způsobem (viz Obr. 2), přičemž stavy zrcadla jsou buď $+X$ stupňů (zapnuto), nebo $-X$ stupňů (vypnuto). U současných zařízení je X obvykle 12 stupňů (nominální hodnota) [4, 5].



Obr. 2: Naklonění mikrozrcadel v závislosti na binární reprezentaci načítaných digitálních obrazových dat (převzato a upraveno) [3]

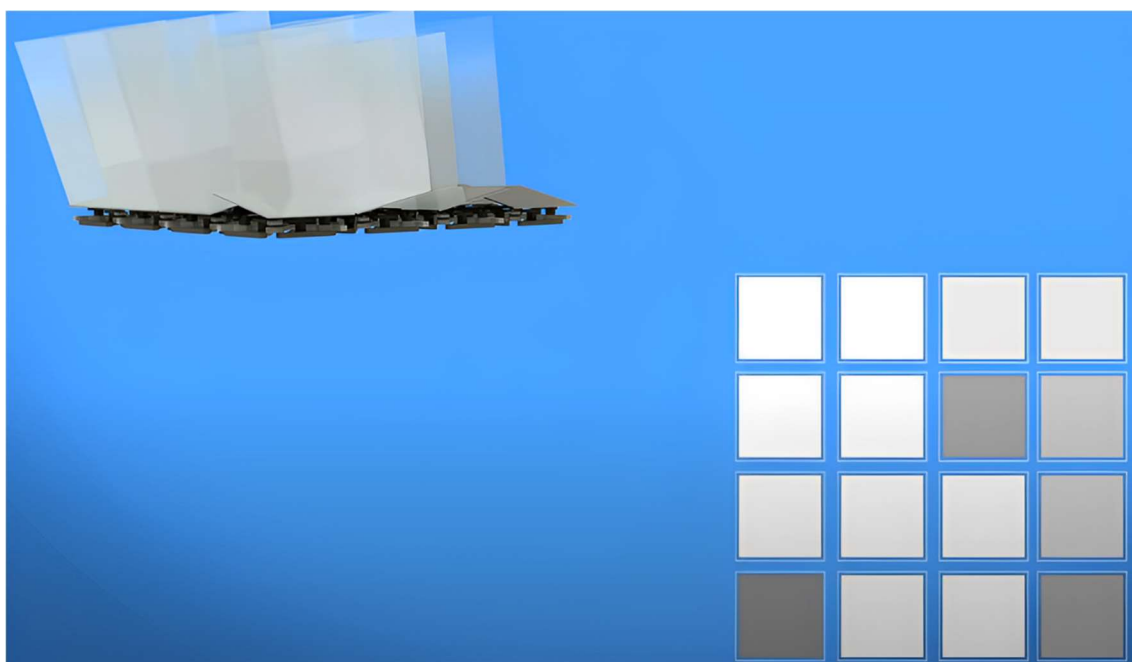
Stav každého mikrozrcadla je závislý na dvou paměťových prvcích CMOS, které jsou umístěny pod ním. Stav obou paměťových prvků není nezávislý, ale vždy se doplňuje. Pokud je jeden prvek v logické 1, pak je druhý prvek v logické 0, stejně tak

naopak. Celkový stav paměťového prvku se podílí na mechanické poloze mikrozrcadla, avšak načtením dat do paměťového prvku se automaticky nemění mechanický stav mikrozrcadla – rozlišují se dva stavy, a to paměťový a mikrozrcadlový, které spolu ale přímo nesouvisí.

Cílem je přenesení paměťového stavu daného paměťovými prvky CMOS do mikrozrcadlového stavu, tzn. aktualizace mechanické polohy mikrozrcadla. Aktualizace mechanické polohy je zajištěna tzv. taktovacím impulzem zrcadla – tento impulz na okamžik uvolní mikrozrcadlo, a poté ho znovu nastaví na základě paměťového stavu.

Světlo odražené zapnutými mikrozrcadly pak prochází projekční čočkou na obrazovku. Světlo odražené vypnutými mikrozrcadly vytvoří tmavé pole a definuje spodní hranici černé barvy obrazu. Obrazy se vytvářejí modulací stupňů šedi mezi zapnutými a vypnutými úrovněmi dostatečně rychle na to, aby je pozorovatel mohl integrovat.

Pro lepší vizualizaci lze každé mikrozrcadlo vnímat jako pixel a soustavu mikrozrcadel jako pole pixelů tvořící výsledný obraz, tzn. „zapnutý“ stav je vnímám z pohledu pozorovatele jako pixel bílé barvy, zatímco „vypnutý“ stav jako pixel černé barvy. Stupně šedi jsou získávány dostatečně rychlým přepínáním mezi těmito dvěma stavy (viz Obr. 3) [4, 5].



Obr. 3: Vizualizace zobrazování stupňů šedi soustavou mikrozrcadel (převzato a upraveno) [3]

2.2 Hardware DLP

V této podkapitole jsou obecně představeny dvě hlavní komponenty vyhodnocovacího modulu, a to řadič DMD DLPC900 a DMD DLP9000. Řadič DLPC900 je kompatibilní

s více typy DMD čipů, a proto jsou jeho technické specifikace vázány ke konkrétnímu DMD čipu a návrhu desky plošných spojů PCB (Printed Circuit Board).

2.2.1 Digitální řídicí jednotka DLPC900 pro pokročilé řízení osvětlení

DLPC900 je škálovatelný řadič DMD, který podporuje spolehlivý provoz DMD čipů DLP6500, DLP9000, DLP500YX a DLP670S. Tento vysoce výkonný řadič DMD umožňuje programovatelné, vysokorychlostní zobrazování vzorů pro pokročilé řízení světla, zejména v průmyslových aplikacích.

Podporované varianty vysokorychlostní zobrazování vzorů různých bitových hloubek umožňují rychlé a přesné 3D skenování a 3D tisk. Kromě toho také podporují aplikace s vysokým rozlišením a inteligentním zobrazováním. Mezi tyto varianty patří např. vysokorychlostní zobrazování vzorů při rychlosti až 16129 Hz v režimu 1bitového předem uloženého vzoru, až 2016 Hz v režimu 8bitového předem uloženého vzoru s modulací osvětlení a až 1008 Hz v režimu 16bitového předem uloženého vzoru s modulací osvětlení.

Řadič je vybaven 128 megabajty vestavěné dynamické paměti s náhodným přístupem DRAM (Dynamic Random Access Memory) pro pohodlné ukládání až 400 1bitových vzorů do vyrovnávací paměti. Kromě vestavěné paměti má také k dispozici externí paměť flash, do které lze uložit až 1066 1bitových binárních vzorů nebo 133 8bitových vzorů ve stupních šedi (v závislosti na kompresi vzorů).

V režimu videa podporuje duální 24bitové RGB vstupy s frekvencí až 120 Hz. Podporované datové formáty jsou YUV, YCrCb a RGB. Dále umožňuje zobrazování standardního videa s rozlišením od SVGA až po WQXGA. Rozlišení je dáno kompatibilním typem připojeného čipu DMD. Některé čipy DMD vyžadují pro provoz řídicí desku se dvěma řadiči DLPC900, např. čipy DLP9000 (2560x1600), DLP500YX (2048x1200) a DLP670S (2716x1600).

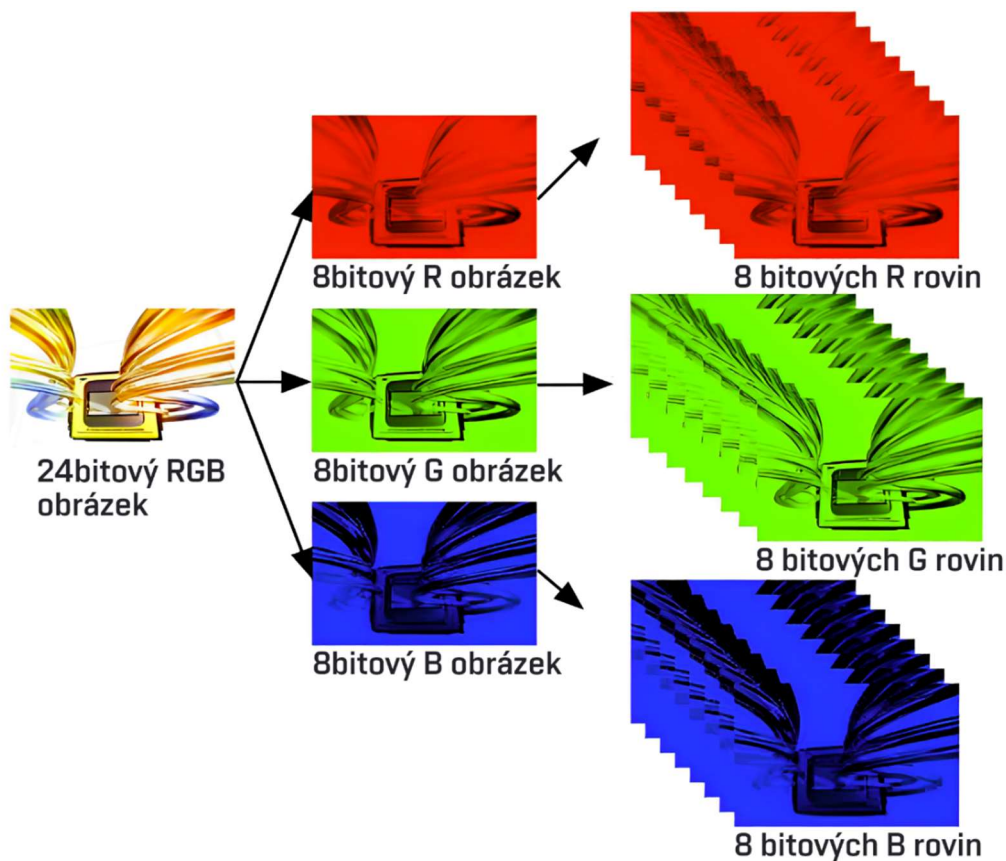
Řadič poskytuje několik funkcí, mezi které patří mapování jedna ku jedné na mikrozrcadla, a také konfiguraci dvou vstupních a výstupních spouští, které nabízejí snadné připojení a synchronizaci s řadou kamer, senzorů a dalších periférií. Dále disponuje plně programovatelnými univerzálními vstupními/výstupními piny GPIO (General-Purpose Input/Output) a pulzně šířkově modulovanými signály PWM (Pulse Width Modulation). Komunikace s řadičem je zprostředkována pomocí několika řídicích rozhraní, např. jedním podřízeným rozhraním USB 1.1 a třemi rozhraními pro komunikaci přes I²C [6, 7].

Reprezentace obrazových dat řadičem

Řadič zpracovává digitální vstupní obraz a převádí data do požadovaného digitálního formátu, který je používán čipy DMD (DLP500YX, DLP670S, DLP9000 nebo DLP6500). Převod digitálních dat řadičem umožňuje čipům DMD odrážet světlo požadovaným způsobem a dosáhnout přesného zobrazení digitálního obrazu. Těchto výsledků je dosaženo řízením každého mikrozrcadla pomocí binární PWM.

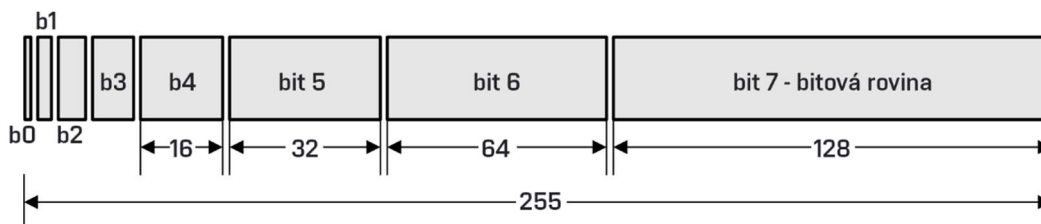
Řadič přijímá jako vstup 16, 20 nebo 24bitová data RGB se snímkovou frekvencí až 120 Hz. Například 24bitový snímek se snímkovou frekvencí 120 Hz se skládá ze tří

barev (červené, zelené a modré), přičemž každá barva je rovnoměrně rozdělena do snímkové frekvence 120 Hz. Každé barvě je tedy přidělen časový slot 2,78 ms. Protože má každá barva 8bitovou hloubku, je každý barevný časový slot dále rozdělen do bitových rovin. Bitová rovina je dvourozměrné uspořádání jednobitových dat extrahovaných ze všech pixelů plnobarevného dvourozměrného snímku (viz Obr. 4), což umožňuje implementaci dynamické hloubky [6].



Obr. 4: Bitové roviny 24bitového RGB obrázku (převzato a upraveno) [6]

Doba trvání každé bitové roviny v rámci časového slotu je určena odpovídající binární hodnotou, která je vážena příslušnou mocninou dvou. Výsledkem je binární PWM obrazu. Pro 24bitový RGB vstup, který obsahuje tři barvy (R, G a B), kde každá má 8bitovou hloubku, je časový slot každé barvy rozdělen do osmi bitových rovin, přičemž součet vah všech bitových rovin v rámci časového slotu je roven 256 (viz Obr. 5) [6].



Obr. 5: Rozdělení bitů ve snímku pro 8bitový monochromatický obraz (převzato a upraveno) [6]

Jeden videosnímek se tedy skládá z řady bitových rovin. Mikrozcadla DMD mohou být buď zapnutá, nebo vypnutá, tzn. zapnutím mikrozrcadel, která odpovídají bitům nastaveným v bitové rovině, se vytvoří obraz. K reprodukci různých úrovní intenzity barev se používá binární PWM, která řídí dobu, po kterou jsou mikrozcadla zapnutá. Když je do řadiče DLPC900 přiveden 24bitový RGB snímek, řadič vytvoří 24bitových rovin, které jsou poté uloženy v jeho interní vestavěné paměti DRAM. Tyto bitové roviny jsou po jedné odesílány do DMD, přičemž bitová váha určuje dobu, po kterou je mikrozcadlo zapnuté. Pro zlepšení kvality obrazu videosnímků jsou bitové roviny, časové intervaly a barevné snímky v rámci funkcí zpracování pixelů řadiče DLPC900 promíchány a proloženy [6].

Funkční režimy řadiče pro aplikace strukturovaného světla

Při aplikacích se strukturovaným světlem lze řadiči zadat příkaz, aby přešel do jednoho ze tří dostupných režimů vysokorychlostního sekvenčního vzoru. Mezi tyto režimy patří režim video vzoru, režim předem uloženého vzoru a režim vzoru za chodu.

V každém režimu je vybrána specifická sada vzorů s maximálním počtem 24 bitů na pixel. Bitová hloubka vzorů se pak přiřadí do odpovídajících časových slotů. Kromě toho je s těmito časovými sloty synchronizován také výstupní spouštěcí signál, který indikuje, kdy se obraz zobrazí, tzn. tyto režimy vzorů umožňují zobrazit sadu vzorů a signalizovat kameře, aby tyto vzory zachytila překryté na objektu.

V režimu video vzoru jsou vzory přenášeny z přichozího zdroje videa, tzn. sekvence vzorů je vytvářena s využitím dat vzorů nebo videa, která jsou přenášena/streamována prostřednictvím paralelního rozhraní RGB. V režimu předem uloženého vzoru jsou vzory předem uloženy v paměti flash¹ a jejich následný přenos do interní paměti řadiče je zprostředkován firmwarem. V režimu vzoru za chodu jsou vzory nahrávány do interní paměti řadiče přímo prostřednictvím rozhraní USB nebo I²C.

Řadič je schopen předem načíst až 400 1bitových binárních vzorů do interní paměti z externí paměti flash nebo z rozhraní USB či I²C. Tyto předem nahrané binární vzory jsou vysokou rychlostí přenášeny do DMD [6].

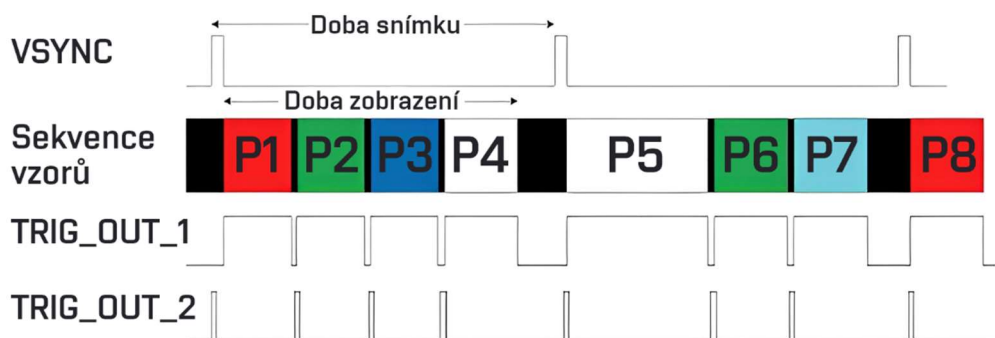
Synchronizace kamery se zobrazovanými vzory v aplikacích strukturovaného světla

Řadič je schopen synchronizovat kameru se zobrazovanými vzory. V závislosti na použitém režimu vzoru se používají různé spouště, které signalizují řadiči přepnutí na další obrazec nebo spuštění/zastavení sekvence vzorů.

V režimu video vzoru se jako vstup spouště používá vertikální synchronizace. V režimu předem uloženého vzoru a v režimu vzoru za chodu se k signalizaci přechodu na další vzor používá uživatelem konfigurovatelná interní spoušť nebo impuls vstupní spouště TRIG_IN_1, zatímco impuls vstupní spouště TRIG_IN_2 spouští a zastavuje sekvenci vzorů. Ve všech zmíněných režimech vzorů se impuls výstupní spouště TRIG_OUT_1 používá k ohraničení expoziční doby vzoru, zatímco impuls výstupní spouště TRIG_OUT_2 signalizuje začátek každého vzoru.

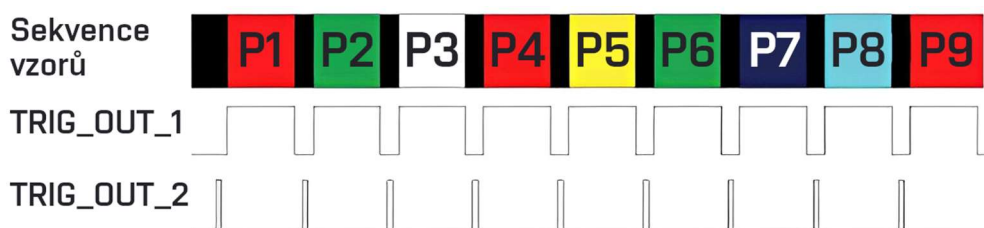
¹ Počet vzorů, které lze uložit do externí flash paměti pomocí režimu předem uloženého vzoru, závisí na velikosti externí flash paměti a dosažitelné úrovni komprese.

Na Obr. 6 je znázorněn příklad časového diagramu pro režim video vzoru. V tomto časovém diagramu je zaznačen princip iniciace sekvence vzorů pomocí signálu vertikální synchronizace VSYNC. Sekvence vzorů se skládá ze série čtyř vzorů, po níž následuje série tří vzorů, která se opakuje. První série sekvence vzorů se skládá ze vzorů P1, P2, P3 a P4. Druhá sekvence vzorů se skládá ze vzorů P5, P6, P7. TRIG_OUT_1 ohraničuje dobu expozice každého vzoru a TRIG_OUT_2 označuje začátek každého vzoru v sekvenci. Pokud je sekvence vzorů nakonfigurována bez tmavé doby mezi vzory, zůstane výstup TRIG_OUT_1 vysoký po celou dobu trvání sekvence vzorů [6].



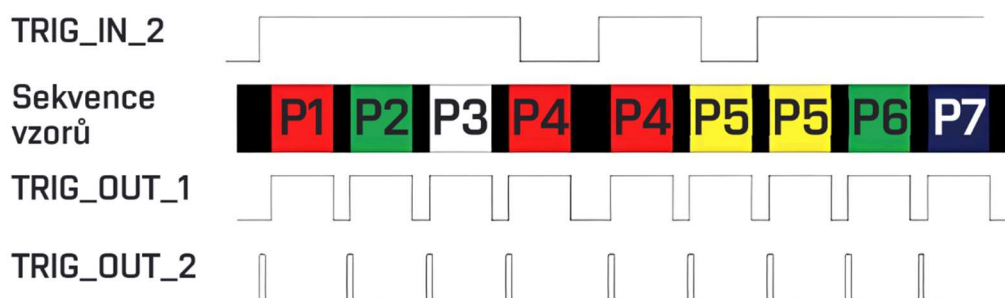
Obr. 6: Časový diagram režimu video vzoru (převzato a upraveno) [6]

Příklad časového diagramu pro režim předem uloženého vzoru je znázorněn na Obr. 7. V tomto časovém diagramu je sekvence vzorů iniciována uživatelem, a to prostřednictvím konfigurovatelné interní spouště, tzn. TRIG_IN_1 a TRIG_IN_2 se nepoužívají. Doba expozice každého vzoru je ohraničena signálem TRIG_OUT_1. TRIG_OUT_2 indikuje začátek každého vzoru v sekvenci. Pokud je sekvence vzorů nakonfigurována bez tmavé doby mezi vzory, pak výstup TRIG_OUT_1 zůstává aktivní po celou dobu trvání sekvence vzorů [6].



Obr. 7: Časový diagram režimu předem uloženého vzoru (převzato a upraveno) [6]

Další příklad časového diagramu pro režim předem uloženého vzoru je uveden na Obr. 8. V tomto časovém diagramu je navíc zakomponován signál TRIG_IN_2, který slouží jako startovací a zastavovací signál sekvence vzorů, tzn. je-li vysoký, sekvence vzorů se spustí nebo pokračuje v zobrazování. Během zobrazování vzoru P4 je TRIG_IN_2 nízký, tzn. sekvence vzorů přestane zobrazovat vzor P4. Když je TRIG_IN_2 zvýšen, pokračuje sekvence vzorů tam, kde se zastavila, a to opětovným zobrazením vzoru P4 [6].



Obr. 8: Časový diagram režimu předem uloženého vzoru se vstupní spouští (převzato a upraveno) [6]

2.2.2 Digitální mikrozrcadlové zařízení DLP9000 s vysokým rozlišením

DMD DLP9000 disponuje více než čtyřmi miliony mikrozrcadel, která jsou schopna modulovat amplitudu, směr a/nebo fázi přicházejícího světla. Tato soustava více než čtyř miliónů mikrozrcadel s roztečí 7,56 mikrometrů tvoří pole o vysokém rozlišení 2560x1600 (WQXGA). Úhlopříčka mikrozrcadlového pole je 0,9 palce. Operativní rozsah vlnových délek od 400 do 700 nanometrů.

Tento čip DMD umožňuje integraci prostorové modulace světla do relativně velkých konstrukčních řešení. Kombinací relativně velkého pracovního prostoru a rozměrových specifikací mikrozrcadlové pole, které zajišťují jemné rozlišení, lze dosáhnout velkých rozměrů tisknutých objektů s vysokou přesností, a proto je tento čip DMD vhodnou variantou pro aplikace 3D tisku. Zároveň jeho vysoké rozlišení poskytuje přímou výhodu při skenování větších objektů v aplikacích 3D strojového vidění [8, 9].

Provozní režimy DMD

DMD je řízeno dvěma řadiči DLPC900. Každý řadič se používá k řízení poloviny DMD (1280x1600). Dalšími specifikacemi této konfigurace jsou podpora pouze nativního rozlišení a možnost překlopení obrazu přes jeho krátkou osu (překlopení svisle).

Podporované provozní režimy se odvíjejí od provozních režimů řadiče DLPC900, který umožňuje čtyři typy provozu, a to režim videa, režim video vzoru, režim předem uloženého vzoru a režim vzoru za chodu.

Technické specifikace režimu videa jsou dány nejen vlastnostmi řadiče a DMD, ale také komponentami přítomnými na řídicí desce, např. typem video přijímače a dostupným portem. Zdroj videa je zobrazován na DMD rychlostí příchozího zdroje videa.

Pro vysokorychlostní zobrazování vzorů v aplikacích se strukturovaným světlem se používají režimy vzorů, kde je rychlost zobrazování dána kombinací řadiče, čipu DMD, bitové hloubky zobrazovaných vzorů a zvoleným režimem. V Tab. 1 jsou zaznačeny dostupné rychlosti zobrazování vzorů pro každý režim vzoru bez využití modulace osvětlení [8].

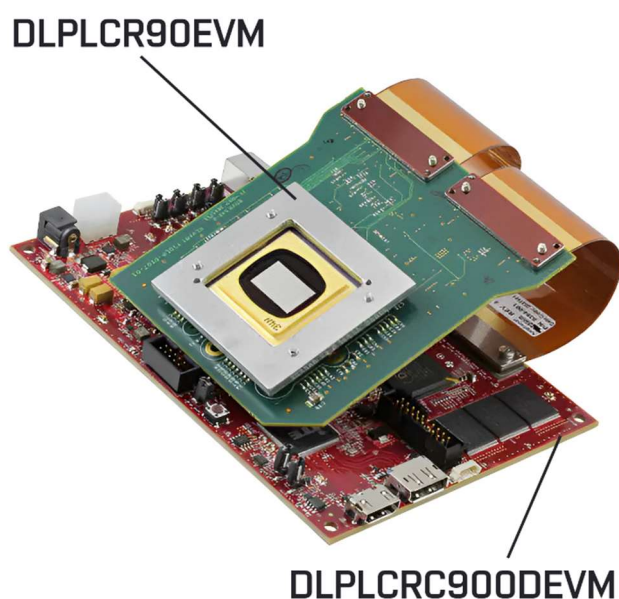
Tab. 1: Rychlost zobrazování vzorů DMD čipem DLP9000 s řadičem DLPC900 [8]

Bitová hloubka	Režim video vzoru (Hz)	Režim předem uloženého vzoru nebo režim vzoru za chodu (Hz)
1	2880	9523
2	1440	3289
3	960	2638
4	720	1364
5	480	823
6	480	672
7	360	500
8	247	247

2.2.3 Vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM

Vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM je vysoce výkonná a flexibilní vývojová sada, která umožňuje začlenění technologie DLP do nejrůznějších aplikací řízení světla, a to díky vysokému rozlišení a možnostem pokročilého ovládání vzorů. Do těchto aplikací patří např. 3D strojové vidění, 3D tisk, aditivní technologie, oftalmologie, 3D skenery pro měření končetin a kůže, 3D zobrazovací mikroskopy atp. Flexibilita tohoto modulu umožňuje jeho použití napříč různými obory od průmyslu až po zdravotnictví/lékařství.

Základem tohoto vyhodnocovacího modulu je čipová sada DLP, která se skládá z čipu DMD DLP9000 a dvou řadičů DLPC900. Každá z těchto komponent je dodávána ve formě samostatného vyhodnocovacího modulu DLP, tzn. DLP LightCrafter 9000 EVM se primárně skládá z vyhodnocovacích modulů DLPLCRC900DEV a DLPLCR90EVM [10, 11].

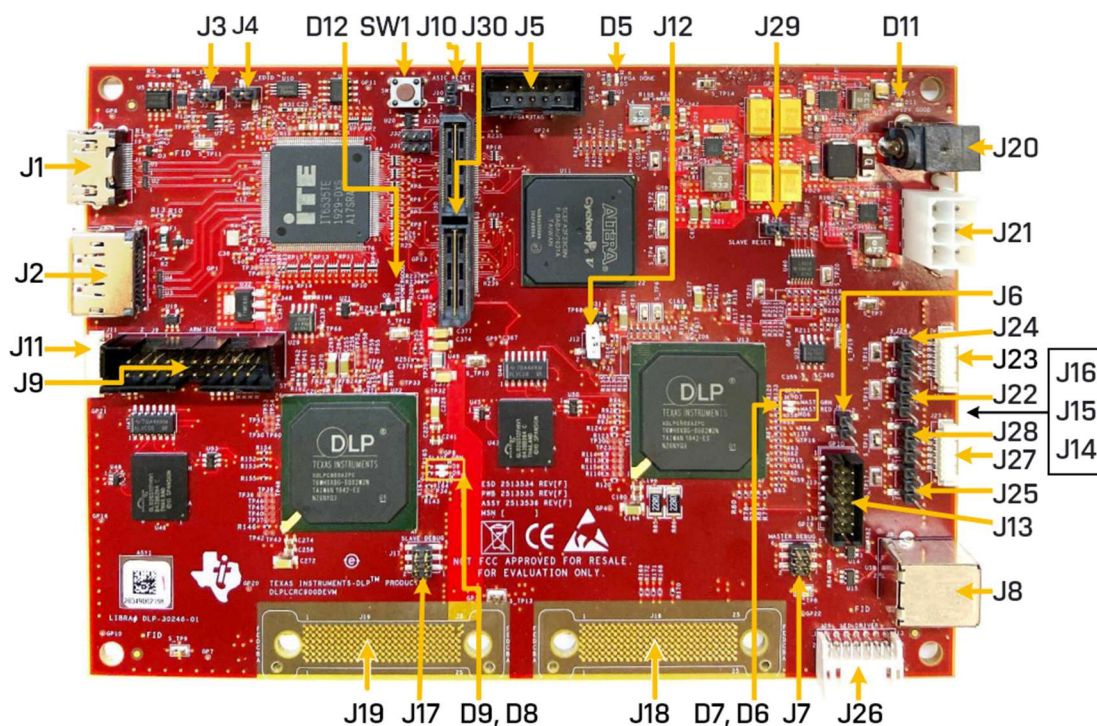


Obr. 9: Vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM (převzato a upraveno) [12]

DLPLCRC900DEVM obsahuje dva řadiče DLPC900, které umožňují konfigurovatelné ovládání DLPLCR90EVM. Zároveň je vybaven vstupními/výstupními spouštěči pro pohodlnou synchronizaci s kamerami, senzory nebo jinými periferními zařízeními. DLPLCR90EVM obsahuje DMD čip DLP9000, který v kombinaci s DLPLCRC900DEVM umožňuje přesné ovládání, resp. zobrazování pixelů vzorů, a to s frekvencí až 9523 Hz pro 1bitové binární vzory (pro tento vyhodnocovací modul platí Tab. 1 v podkapitole 2.2.2). Režim videa je limitován čipem video přijímače, zároveň je snímková frekvence v tomto režimu závislá na použitém portu – 30 Hz pro HDMI a 60 Hz pro DisplayPort [10, 11, 13, 14].

Konektivita

Na Obr. 10 je zobrazeno rozložení přepínačů a konektorů přítomných na vyhodnocovacím modulu DLPLCR900DEVM. Přepínače a konektory jsou popsány kódovým označením, které slouží jako reference k jejich příslušnému popisu, který se nachází v Tab. 2 [10].



Obr. 10: Pohled shora na DLPLCRC900DEVM (převzato a upraveno) [10]

Tab. 2: Konektory přítomné na DLPLCRC900DEVM [10]

Reference	Název/funkce	Popis použití
SW1	Spínač resetování na úrovni desky	Po stisknutí resetuje oba ovladače. Po uvolnění se oba řadiče spustí z resetu.
J1	HDMI vstup	primární video vstup do video rozdělovače FPGA, vstupy režimů video a video vzoru

Reference	Název/funkce	Popis použití
J2	DisplayPort vstup	sekundární video vstup do video rozdělovače FPGA, vstupy režimů video a video vzoru.
J3	EDID propojka (HDMI)	Když je propojka nainstalována, lze aktualizovat EDID PROM pro rozhraní HDMI.
J4	EDID propojka (DisplayPort)	Když je propojka nainstalována, lze aktualizovat EDID PROM pro rozhraní DisplayPort.
J5	Konektor pro programování FPGA (rozdělovač videa Intel)	připojení programovacích nástrojů Intel (Altera) FPGA, programování FPGA rozdělovače videa
J6	Výstup OCLKA	uživatelsky konfigurovatelný výstupní hodinový signál pro další uživatelskou logiku na desce
J7	Ladicí UART primárního řadiče	rozhraní UART primárního řadiče pro zprávy ladění do terminálu
J8	Hostitelské rozhraní USB	rozhraní USB pro komunikaci hostitele s řadičem
J9	Ladič ARM RVI ICE	Pouze pro použití výrobcem; používá se pro ladění softwarového kódu DLPC900 ARM, vyžaduje debugger ARM RVI ICE.
J10	Resetovací propojka řadiče	Když je propojka nainstalována, řadič je držen v režimu RESET.
J11	JTAG konektor	Slouží k naprogramování zaváděcího obrazu do paměti flash, když je paměť flash prázdná nebo poškozená.
J12	Propojka zaváděcího režimu	Pokud je propojka nainstalována, nutí řadiče zůstat v zaváděcím režimu po připojení napájení.
J13	Vstupy/výstupy GPIO	uživatelsky konfigurovatelné univerzální vstupy a/nebo výstupy
J14	Hostitelský port I ² C 0	hostitelský vyhrazený port rozhraní I ² C pro komunikaci s řadičem
J15	Hostitelský port I ² C 1	port rozhraní I ² C pro programování EDID UART
J16	Hostitelský port I ² C 2	port rozhraní I ² C pro interní použití výrobcem
J17	Ladicí UART sekundárního řadiče	rozhraní UART sekundárního řadiče pro zprávy ladění do terminálu
J18	DMD flex konektor primárního řadiče	připojení flex kabelu pro datové rozhraní mezi deskou a DMD

Reference	Název/funkce	Popis použití
J19	DMD flex konektor sekundárního řadiče	připojení flex kabelu pro datové rozhraní mezi deskou a DMD
J20	Napájecí vstup +12 VDC	napájecí vstup vyhodnocovacího modulu
J21	Alternativní napájecí vstup + 12 VDC	alternativní napájecí vstup vyhodnocovacího modulu
J22	Voliče úrovně napětí spouštěcího vstupu 1	nastavení úrovně napětí signálů spouštěcího vstupu 1
J23	Konektory externích spouštěcích vstupů	spouštěcí vstup 1 a 2 pro spouštění řadiče pomocí externích vstupních signálů
J24	Voliče úrovně napětí spouštěcího vstupu 2	nastavení úrovně napětí signálů spouštěcího vstupu 2
J25	Voliče úrovně napětí spouštěcího výstupu 1	nastavení úrovně napětí signálů spouštěcího výstupu 1
J26	Povolení a ovládání LED	povolení LED výstupů a nastavení hodnoty proudu
J27	Konektory spouštěcích výstupů	spouštěcí výstupy 1 a 2 pro spouštění externích zařízení pomocí výstupních signálů
J28	Voliče úrovně napětí spouštěcího výstupu 2	nastavení úrovně napětí signálů spouštěcího výstupu 2
J29	Resetovací propojka sekundárního řadiče	Když je propojka nainstalována, sekundární řadič je držen v režimu RESET.
J30	Externí paralelní video RGB vstup	připojení video přijímače s výstupy RGB
D5	Stav inicializace FPGA	Svítlí-li, znamená to, že FPGA je, po připojení napájení, nakonfigurován bez chyb.
D6	Červená chybová LED primárního řadiče	Svítlí-li, znamená to, že došlo k poruše v primárním řadiči.
D7	Zelená blikající LED primárního řadiče	Blikání indikuje, že je v provozu primární řadič.
D8	Červená chybová LED sekundárního řadiče	Svítlí-li, znamená to, že došlo k poruše v sekundárním řadiči.
D9	Zelená blikající LED sekundárního řadiče	Blikání indikuje, že je v provozu sekundární řadič.
D11	LED 12 V napájení	Svítlí-li, znamená to, že je zapnuto externí napájení 12 V.
D12	PWRGOOD LED	Svítlí-li, znamená to, že je napájení normální.

Detailní informace – ohledně povolených hodnot napětí v konektorech a významu jednotlivých pinů – se nacházejí v dokumentaci² poskytované výrobcem TI (Texas Instruments).

Propojení s vyhodnocovacím modulem

Vyhodnocovací modul je připraven k použití ihned po vybalení z krabice. Kroky 1 až 5 popisují, jak napojit modul na zdroj napájení, ověřit správnou funkčnost zařízení a připojit modul k PC [10]:

1. Provést připojení 12 V DC napájecího zdroje ke konektoru J20 (viz Obr. 10).
2. LED indikátory D5, 11 a D12 se rozsvítí zeleně, což signalizuje normální konfiguraci a napájení.
3. LED indikátory D7 a D9 blikají, což znamená, že oba řadiče DLPC900 pracují normálně.
4. Po pěti sekundách začnou oba řadiče odesílat vestavěnou sekvenci opakujících se vzorů do DMD pro zobrazení na DMD.
5. Provést připojení kabelu USB z PC ke konektoru J8 (viz Obr. 10). Při prvním připojení kabelu k PC se vyhodnocovací modul zapíše jako složené zařízení USB s třídou zařízení pro lidské rozhraní HID (Human Interface Device). Nejsou potřeba žádné ovladače, protože ty jsou nativně zpracovány všemi operačními systémy. Bližší informace o způsobu komunikace přes rozhraní USB jsou poskytnuty v podkapitole 3.2.1.

Vyhodnocovací modul může být ovládán pomocí bezplatné aplikace s grafickým uživatelským rozhraním GUI (Graphical User Interface) a firmwarem, které jsou k dispozici ze stránek výrobce Texas Instruments. Tato aplikace poskytuje širokou škálu funkcí pro ovládání vyhodnocovacího modulu. Popis aplikace GUI, představení dostupných funkcí a ukázkové příklady ovládání vyhodnocovacího modulu se nacházejí v kapitole 4.

² DLP® LightCrafter™ 6500 and 9000 Evaluation Module (EVM) User's Guide nebo DLP® LightCrafter™ Dual DLPC900 Evaluation Module (EVM) User's Guide.

3 PŘÍKAZOVÉ ŘÍDICÍ ROZHŘANÍ

Provoz DLP LightCrafter 9000 EVM je zajištěn příkazovým a řídicím rozhraním řadiče DLPC900. Řídicí rozhraní umožňuje jinému nadřazenému (hostitelskému) procesoru posílat příkazy a data do DLPC900. Hostitelský procesor je schopen dotazovat se na stav systému nebo provádět operace v reálném čase. Podporovanými protokoly rozhraní mezi DLPC900 a hostitelským procesorem jsou I²C a USB 1.1 [15].

3.1 I²C

Řadič DLPC900 používá protokol I²C k výměně příkazů a dat mezi hostitelským procesorem. I²C je jednoduchá obousměrná dvou vodičová sběrnice pro efektivní řízení mezi integrovanými obvody. Sběrnice I²C vyžaduje pouze dvě sběrnice linky, a to sériovou datovou linku SDA (Serial Data) a sériovou hodinovou linku SCL (Serial Clock). Všechna zařízení kompatibilní se sběrnicí I²C jsou vybavena rozhraním na čipu, které jim umožňuje komunikovat přímo mezi sebou prostřednictvím sběrnice. Každé zařízení připojené ke sběrnicí je softwarově adresovatelné pomocí jedinečné adresy. Princip komunikace mezi zařízeními je založen na modelu master-slave.

SDA i SCL jsou obousměrné linky, které jsou připojené ke kladnému napájecímu napětí přes proudový zdroj nebo pull-up rezistor. Vzhledem k rozmanitosti různých technologických zařízení (CMOS, NMOS, bipolární), která lze připojit ke sběrnicí I²C, nejsou úrovně logických 0 a 1 pevně stanoveny a závisí na příslušné úrovni napájecího napětí [15, 16].

3.1.1 Transakční struktura I²C

Všechny transakce I²C začínají podmínkou START a jsou ukončeny podmínkou STOP. Podmínka START je definována přechodem z vysoké úrovně signálu na nízkou na lince SDA, zatímco signál na lince SCL je na vysoké úrovni. Podmínka STOP je definována přechodem z nízké na vysokou úroveň signálu na lince SDA, zatímco signál na lince SCL je na vysoké úrovni.

Datové přenosy mají formát definovaný následujícím způsobem. Po podmínce START je odeslána cílová adresa. Tato adresa je dlouhá 7 bitů (používá se režim 7bitového adresování), po níž následuje osmý bit, který je bitem směru dat – „nula“ označuje přenos (zápis) a „jednička“ označuje požadavek na data (čtení). Počet bajtů, které lze přenést za jeden přenos, není omezen. Za každým bajtem musí následovat potvrzovací bit ACK (Acknowledge Bit). Data se přenášejí s nejvýznamnějším bitem jako prvním. Přenos dat je vždy ukončen podmínkou STOP generovanou řadičem.

Transakce datových bajtů mezi nadřazeným zařízením (master) a podřazeným zařízením (slave) je prováděna čtením nebo zápisem do registrů podřazeného zařízení nebo z nich. Registry jsou místa v paměti podřazeného zařízení, která obsahují informace, ať už jde o konfigurační informace nebo některá vzorkovaná data, která se mají poslat

zpět nadřizovanému zařízení. Nadřizované zařízení musí do těchto registrů zapsat informace, aby dalo podřizovanému zařízení pokyn k provedení nějaké úlohy. Některá zařízení jsou jednoduchá a obsahují pouze jeden registr, do kterého lze zapisovat přímo odesláním dat registru za adresou podřizované zařízení namísto adresování registru.

Řadič DLPC900 umožňuje uživateli nastavit jinou adresu I²C pro podřizovaný hostitelský port. Vzhledem k 7bitovému adresování je nejméně významný bit nositelem směru dat, a proto jsou rozdílné adresy hostitelského portu pro čtení a zápis. Adresa pro zápis musí být sudá, zatímco adresa pro čtení se rovná adrese pro zápis s nastaveným nejméně významným bitem na 1. Výchozí nastavení adres je uvedeno v Tab. 3 [15, 16].

Tab. 3: Výchozí nastavení I²C pro podřizované zařízení [15]

Režim adresování	Výchozí adresa pro zápis	Výchozí adresa pro čtení	Maximální hodinový takt [kHz]
7bitové	0x34	0x35	400

Podadresa I²C řadiče DLPC900 odpovídá bajtové adrese příkazů řadiče DLPC900. Většina podadres I²C se skládá ze dvojice příkazů – čtení a zápis. Příkaz pro zápis se rovná příkazu pro čtení s nastaveným nejvýznamnějším bitem. Například Tab. 4 a 6 uvádějí dvojici podadres příkazů pro výměnu vstupních datových kanálů (Input Data Channel Swap), kde příkaz podadresy pro zápis 0x84 je příkaz podadresy pro čtení 0x04 s nastaveným nejvýznamnějším bitem. Každý příkaz podadresy vyžaduje určitý počet datových bajtů a po každém příkazu následují data s proměnnou délkou, kde nejméně významný bajt je u každého parametru uveden jako první³.

Interní vyrovnávací paměť příkazů DLPC900 má maximálně 512 bajtů a je sdílena mezi příkazy pro čtení a zápis. Z tohoto důvodu musí po provedení příkazu čtení následovat operace I²C čtení adresy podřizovaného zařízení, aby byla data načtena, jinak dojde k jejich přepsání dalším provedeným příkazem [15].

3.1.2 Příklad sekvence příkazů I²C pro čtení

Pro provedení příkazu ke čtení nastavení Input Data Channel Swap hostitel sestaví sekvenci bajtů obsahující adresu podřizovaného zařízení, podadresu a data (pokud existují) a provede následující kroky [15]:

1. Hostitel provede požadovanou podmínku START následovanou odesláním sekvence bajtů.
2. DLPC900 udržuje signál na nízké úrovni na lince SCL, aby signalizoval, že je zaneprázdněn.
3. Hostitel čeká, až DLPC900 uvolní linku SCL.
4. Jakmile se linka SCL uvolní (přejde do vysoké úrovně signálu), hostitel provede podmínku STOP.

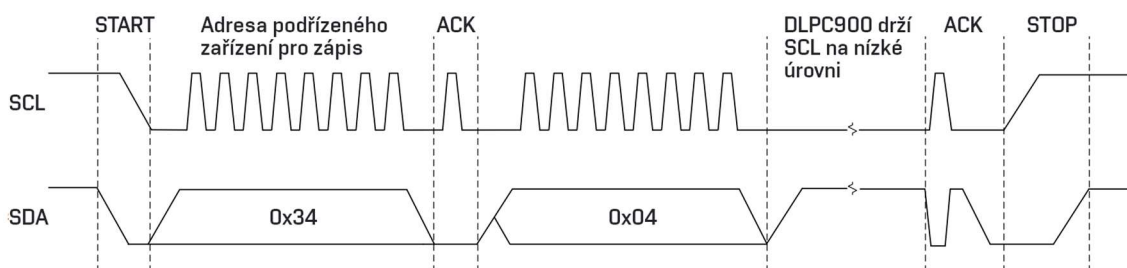
³ Data příkazů I²C řadiče DLPC900 jsou formátována tak, že každý parametr v datech má jako první nejméně významný bajt. Tím je zachován stejný formát jako u protokolu USB.

5. Hostitel poté provede podmínku START následovanou odesláním adresy podřízeného zařízení (0x35) a po přečtení požadovaného počtu bajtů provede ukončení podmínkou STOP.

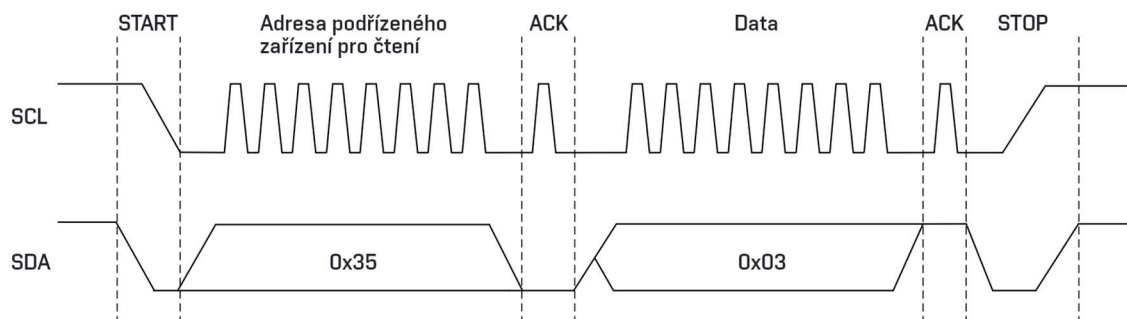
Příklad výše uvedené sekvence příkazů pro čtení je uveden v Tab. 4 a diagram průběhu signálu od hostitele provádějícího tuto sekvenci čtení je zobrazen na Obr. 11 a 12.

Tab. 4: Příklad sekvence příkazů I²C pro čtení [15]

Adresa podřízeného zařízení	Podadresa	Data
0x34	0x04	
0x35		0x03



Obr. 11: Diagram průběhu signálu příkazu I²C pro čtení (převzato a upraveno) [15]



Obr. 12: Diagram průběhu signálu operace I²C pro čtení dat (převzato a upraveno) [15]

Některé příkazy pro čtení podadresy vyžadují, aby byl do sekvence zahrnut parametr (parametry). Například příkaz pro konfiguraci univerzálních vstupních/výstupních pinů GPIO (General-purpose input/output) má na výběr více GPIO. Proto musí být parametr výběru GPIO zahrnut do sekvence bajtů pro čtení, aby bylo možné načíst konfiguraci pro vybraný GPIO.

V Tab. 5 jsou zaznačeny dvě operace I²C, kde první řádek obsahuje parametrová data 0x06, která označují GPIO 6. Druhý řádek jsou vrácená data 0x06 a 0x03, kde 0x06 byl vybraný GPIO 6 s konfigurací 0x03 [15].

Tab. 5: Příklad sekvence příkazů I²C pro čtení s parametrem [15]

Adresa podřízeného zařízení	Podadresa	Data
0x34	0x44	0x06
0x35		0x06 0x03

3.1.3 Příklad sekvence příkazů I²C pro zápis

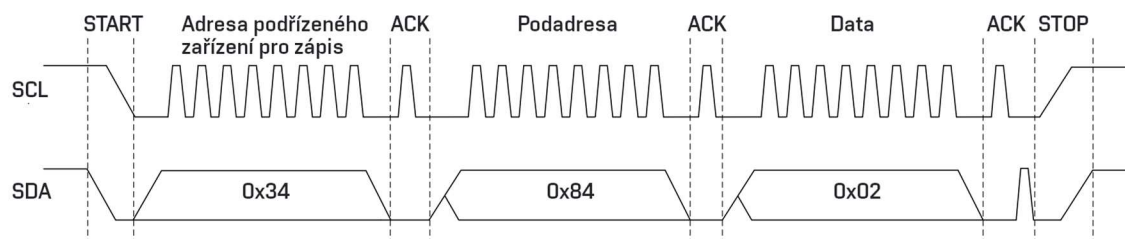
Pro provedení příkazu pro nastavení hodnoty Input Data Channel Swap hostitel sestaví sekvenci bajtů obsahující adresu podřízeného zařízení, podadresu a data a provede následující kroky [15]:

1. Hostitel provede požadovanou podmínku START následovanou odesláním sekvence bajtů.
2. Hostitel provede podmínku STOP.

Příklad výše uvedené sekvence příkazů pro zápis je uveden v Tab. 6 a diagram průběhu signálu od hostitele provádějícího tuto sekvenci zápisu je zobrazen na Obr. 13.

Tab. 6: Příklad sekvence příkazů I²C pro zápis [15]

Adresa podřízeného zařízení	Podadresa	Data
0x34	0x84	0x02

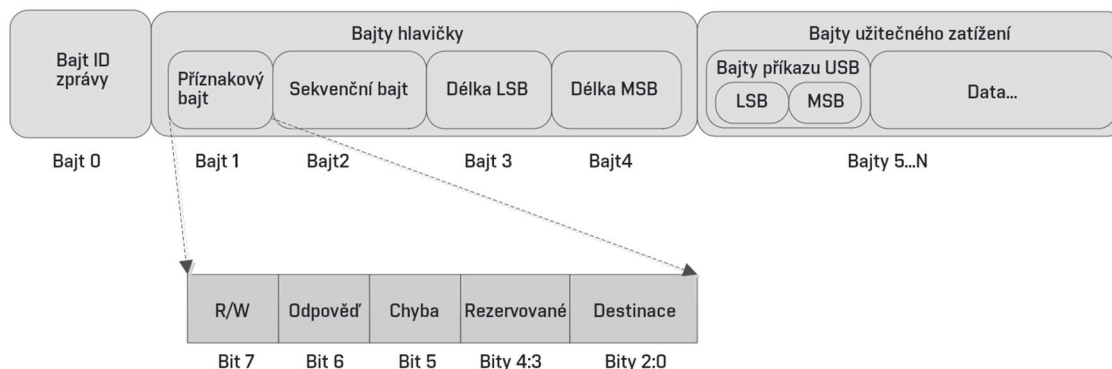
Obr. 13: Diagram průběhu signálu příkazu I²C pro zápis (převzato a upraveno) [15]

3.2 USB

Řadič DLPC900 podporuje také rozhraní USB 1.1 (HID) pro výměnu příkazů a dat s hostitelským procesorem. Příkazy USB jsou datové pakety s proměnlivou délkou, které jsou pro každý parametr odesílány s nejméně významným bajtem jako prvním [15].

3.2.1 Transakční struktura USB

Protokol USB 1.1 HID má strukturu znázorněnou na Obr. 14. Hostitel musí vytvořit řetězec bajtů, který se skládá z ID zprávy, záhlaví (hlavičky) a datové části (užitečného zatížení). Nejméně významný bajt LSB (Least Significant Byte) předchází nejvýznamnější bajt MSB (Most Significant Byte) [15].



Obr. 14: Struktura transakce USB HID pro komunikaci s DLPC900 (převzato a upraveno) [15]

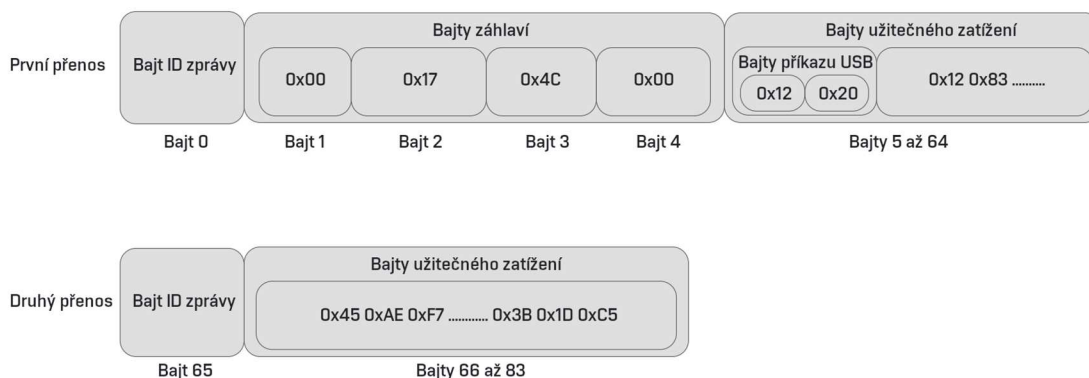
- **ID zprávy** – počáteční bajt všech přenosů a vždy je nastaven na 0x00.
- **Záhlaví zprávy** – obsahuje celkem 4 bajty:
 - **Príznakový bajt** – definuje transakční sekvenci (viz podkapitola 3.2.2 a 3.2.3).
 - **Sekvenční bajt** – klouzavý čítač, který se používá především v transakcích, ve kterých hostitel požaduje od řadiče DLPC900 odpověď. Zpráva s požadavek zpětné vazby definována uživatelem si nese určitou hodnotu sekvenčního bajtu. Zpětná vazba od řadiče v podobě zprávy si nese také určitou hodnotu sekvenčního bajtu. Hostitel poté může porovnat sekvenční bajt požadavku se sekvenčním bajtem zpětné vazby.
 - **Dva bajty délky** – označují počet bajtů v datové části zprávy.
- **Datová část zprávy** – skládá se ze dvou bajtů příkazu USB a variabilním počtem datových bajtů, jejichž počet je dán definicí přítomného příkazu.

Během operace zápisu hostitel přeneše celou transakční sekvenci do DLPC900, které následně provede operaci spojenou s příkazem pro zápis. Během operace čtení hostitel přeneše celou transakční sekvenci do DLPC900, které následně provede operaci spojenou s příkazem pro čtení. Z tohoto důvodu jsou transakce zápisu a čtení považovány za zápisy do DLPC900. Hostitel provádí zápis WriteFile na úrovni aplikačního programovacího rozhraní API (Application Programming Interface) do ovladače HID. Rozdíl je v případě, kdy DLPC900 provede operaci čtení a uloží odpověď do své interní vyrovnávací paměti. Předání dat odpovědi hostiteli z DLPC900 se provede teprve tehdy, kdy hostitel provede operaci čtení ReadFile na úrovni API z ovladače HID.

Z důvodu sdílené interní vyrovnávací paměti příkazů, která byla zmíněna v podkapitole 3.1, je nutné, aby po provedení operace čtení hostitelem následovalo čtení na úrovni API z ovladače HID.

Protokol HID je omezen na přenos 64 bajtů v obou směrech, proto příkazy větší než 64 bajtů vyžadují více přenosů. Kdykoli je takový příkaz použit, pouze první přenos vyžaduje záhlaví a příkaz USB. ID zprávy je vždy vedoucím bajtem všech přenosů. Na Obr. 15 je zobrazen příklad příkazu pro zápis, který obsahuje 76 bajtů a vyžaduje dva

přenosy, kde první přenos obsahuje 65 bajtů. Ovladač HID na hardwarové úrovni hostitele extrahuje ID zprávy před přenosem nebo příjmem dat po sběrnici USB [15].



Obr. 15: Struktura transakce USB HID s více přenosy pro komunikaci s DLPC900 (převzato a upraveno) [15]

3.2.2 Příklad transakční sekvence USB pro čtení

Pro provedení operace čtení na DLPC900 musí hostitel sestavit sekvenci bajtů, která odpovídá použitému příkazu. Následující Tab. 7 a popis ukazuje příklad, jak číst intenzitu barvy clony pro každou barvu [15].

Tab. 7: Příklad odeslání požadavku pro získání dat ze zařízení přes rozhraní USB [15]

Bajt ID zprávy	Příznakový bajt	Sekvenční bajt	Bajty délky	Bajty příkazu USB
0x00	0xC0	0x11	0x02 0x00	0x00 0x11

1. Bajt ID zprávy je vždy nastaven na 0x00.
2. Příznakový bajt:
 - a. Bity 2:0 jsou pro běžný provoz DLPC900 nastaveny na 0.
 - b. Bit 6 je nastaven na 1, čímž se zadává požadavek od hostitele pro získání odpovědi ze zařízení.
 - c. Bit 7 je nastaven na 1 pro označení požadované transakce čtení.
3. Sekvenční bajt je klouzavý čítač a používá se především tehdy, když hostitel požaduje od DLPC900 odpověď.
4. Dva bajty délky označují počet bajtů v datové části zprávy (nezahrnují počet bajtů v krocích 1 až 4). Označují počet bajtů odeslaných v kroku 5.
5. Dva bajty příkazu USB.
6. Jakmile hostitel přeneše data (příkazové bajty) přes rozhraní USB, DLPC900 odpoví na operaci čtení, a to umístěním dat do své interní vyrovnávací paměti. Hostitel poté musí provést operaci čtení ovladače HID. V Tab. 8 jsou uvedeny bajty odpovědi, které byly odeslané z DLPC900. Jejich význam je následující:
 - a. Bajt ID zprávy je vždy nastaven na 0x00.

- b. Příznakový bajt je stejný jako byl odeslán, ale s nastaveným bitem 5 (chybovým bitem). Hostitel může zkontrolovat příznak chyby následujícím způsobem:
 - i. V případě, že nedošlo k chybě, je hodnota bitu rovna 0.
 - ii. V případě, že příkaz nebyl nalezen nebo selhal, je hodnota bitu rovna 1.
- c. Sekvenční bajt je stejný jako byl odeslán. Hostitel může porovnat odeslaný sekvenční bajt se sekvenčním bajtem odpovědi.
- d. Délka neboli počet datových bajtů.
- e. Datové bajty sestavené dle definice příkazu.

Tab. 8: Příklad odpovědi ze zařízení po odeslání požadavku přes rozhraní USB [15]

Bajt ID zprávy	Příznakový bajt	Sekvenční bajt	Bajty délky	Datové bajty
0x00	0xC0	0x11	0x06 0x00	0xFF 0x11 0xFF 0x11 0xFF 0x11

3.2.3 Příklad transakční sekvence USB pro zápis

Pro provedení operace zápisu na DLPC900 musí hostitel sestavit sekvenci bajtů, která odpovídá použitému příkazu. Následující Tab. 9 ukazuje příklad, jak nastavit intenzitu barvy záclony pro každou barvu na 511 [15].

Tab. 9: Příklad odeslání požadavku pro úpravu hodnot nastavení přes rozhraní USB [15]

Bajt ID zprávy	Příznakový bajt	Sekvenční bajt	Bajty délky	Bajty příkazu USB	Datové bajty
0x00	0x00	0x12	0x08 0x00	0x00 0x11	0xFF 0x11 0xFF 0x11 0xFF 0x11

1. Bajt ID zprávy je vždy nastaven na 0x00.
2. Příznakový bajt:
 - a. Bity 2:0 jsou pro běžný provoz DLPC900 nastaveny na 0.
 - b. Bit 6 je nastaven na 0, čímž se označuje, že hostitel nepožaduje od zařízení odpověď.
 - c. Bit 7 je nastaven na 0 pro označení požadované transakce zápisu.
3. Za normálních okolností během operace zápisu není vyžadována odpověď od DLPC900. Hostitel však může pokračovat v inkrementaci sekvenčního bajtu pro další příkazovou operaci.
4. Dva bajty délky označují počet bajtů v datové části sekvence (nezahrnují počet bajtů v krocích 1 až 4). Označují celkový počet bajtů odeslaných v krocích 5 (příkazové bajty) a 6 (datové bajty).
5. Dva bajty příkazu USB.
6. Datové bajty sestavené dle definice příkazu.

4 SADA FIRMWARU A SOFTWARE

Sada DLPC900REF-SW je komplexní balíček firmwaru a softwaru poskytovaný společností Texas Instruments pro vývojáře pracující s vyhodnocovacím modulem DLP LightCrafter 9000 EVM. Balíček obsahuje aplikaci s GUI založenou na QT, která vývojářům umožňuje ovládat modul prostřednictvím rozhraní USB. QT je multiplatformní framework pro aplikace a uživatelské rozhraní s dostupnými open-source i komerčními licencemi. GUI bylo vyvinuto pomocí knihovny QT a nástroje QT Creator pro operační systém Windows. GUI poskytuje intuitivní a snadno použitelné rozhraní pro konfiguraci a ovládání modulu.

Kromě aplikace GUI obsahuje sada několik dalších komponent, které vývojářům poskytují pokročilé ovládání a flexibilitu. Přítomnost rozhraní a technologie pro testování, programování a ladění integrovaných obvodů JTAG (Joint Test Action Group), známé také jako hraniční skenování (boundary-scan), spolu s aplikací JTAG Flash Programmer dává vývojářům možnost nahrát konfigurační firmware DLPR900 do paměti flash připojené k radiči DLPC900. Programování pomocí JTAG/boundary-scan umožňuje vývojářům instalovat firmware DLPR900 bez standardního připojení USB, což je užitečné zejména ve výrobních prostředích, ale i v případě, kdy dojde k poškození zavaděče a deska modulu se stane nefunkční.

Balíček obsahuje také konfigurační skripty pro rozšířená identifikační data displeje EDID (Extended Display Identification Data) pro aktualizaci EDID DisplayPortu v radiči modulu. EDID je standardizovaný datový formát, který digitální displeje používají ke sdělování svých schopností připojenému zařízení. Konfigurační skripty EDID dodávané v sadě umožňují vývojářům přizpůsobit data EDID v modulu, což může pomoci zajistit kompatibilitu zařízení s širokou škálou zobrazovacích systémů.

Další důležitou součástí balíčku je binární soubor, který slouží ke konfiguraci programovatelného hradlového pole FPGA (Field Programmable Gate Array) v modulu. FPGA je typ programovatelného logického čipu, který lze po výrobě překonfigurovat. Přítomností konfiguračního souboru pro FPGA je umožněno zobrazování 24bitových dat RGB. Tato funkcionality zobrazování 24bitových dat RGB umožňuje vývojářům využít plný potenciál zobrazovacích schopností modulu.

Vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM podporuje dva hlavní provozní režimy, a to režim videa a režim sekvence vzorů. V režimu videa lze zobrazovat obrazy ze vstupů HDMI a DisplayPort, 24bitové RGB zákaznické bitmapové obrázky uložené v paměti flash, interní generátor testovacích vzorů s deseti uživatelem volitelnými testovacími vzory nebo celistvý celoobrazovkový obraz s barvami volenými uživatelem. Režim sekvence vzorů se dále dělí podle toho, jakým způsobem jsou načítány bitmapové obrázky, a to na režim předem uložených vzorů, režim video vzorů a režim vzorů za chodu. V režimu předem uložených vzorů jsou načítány bitmapové obrázky z paměti flash, kde byly předem uloženy. V režimu video vzorů jsou bitmapové obrázky streamovány přes 24bitové rozhraní radiče DLPC900. V režimu vzorů za chodu jsou

bitmapové obrázky dynamicky načítány do interní paměti prostřednictvím rozhraní USB nebo I²C. V režimech sekvence vzorů se pod pojmem vzor myslí 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 a 8bitové uživatelsky definované bitmapové obrázky.

Celkově lze říct, že sada DLPC900REF-SW poskytuje vývojářům výkonnou sadu nástrojů pro vývoj vlastních produktů založených na DLP LightCrafter 9000 EVM. Díky komplexnímu balíčku firmwaru a softwaru, pokročilému ovládání a flexibilitě a podpoře zobrazování ve vysokém rozlišení a vlastních konfigurací EDID je DLP LightCrafter 9000 EVM výkonným nástrojem umožňujícím použití v široké škále zobrazovacích aplikací [10, 17, 18].

4.1 Aplikace DLP LightCrafter DLPC900 GUI

Software pro ovládání vyhodnocovacího modulu DLP LightCrafter 9000 EVM v prostředí operačního systému Windows má podobu aplikace GUI. Po spuštění aplikace se zobrazí informační panel, kde jsou informace o modulu, který je připojen k hostitelskému PC prostřednictvím rozhraní USB. Informační panel obsahuje vizuální reprezentaci aktuálně připojeného modulu a odkazy na online zdroje, které mohou být užitečné pro řešení problémů. Rozvržení aplikace je zobrazeno na Obr. 16 [10, 18]:



Obr. 16: DLP LightCrafter DLPC900 GUI

- Vlevo se nachází běžné ovládací prvky spolu s indikátory stavu systému.
- V horní části jsou situována tlačítka pro přepínání mezi ovládacími funkcemi systému.
- Uprostřed jsou zobrazovány panely s nastaveními, která obsahují odpovídající parametry pro ovládání funkcí systému.

Aplikace umožňuje uživatelům získávat a programovat nastavení prostřednictvím tlačítek Get a Set. Získávání a programování nastavení je nutné vnímat jako posílání a přijímání příkazů s příslušnými daty, tzn. pro práci s některými nastaveními je nutné provedení dodatečných kroků, resp. příkazů, aby došlo k aktualizaci zobrazení aplikace [10, 18].

4.1.1 Společné ovládací prvky systému

Aplikace komunikuje s řadičem DLPC900 pomocí rozhraní USB 1.1. Řadič se zapíše jako zařízení USB s podporou HID. Hostitelský počítač se dotazuje na všechna periferní zařízení HID a jakmile počítač detekuje přítomnost řadiče, resp. jeho úspěšné připojení, změní se popisek a barva indikátoru připojení z Disconnected a červené barvy na Connected a zelenou barvu. Pokud je kabel USB odpojen, změní se popisek indikátoru připojení opačným způsobem. Po úspěšném připojení hostitelského počítače k modulu a změně indikátoru připojení se zobrazí verze firmwaru spolu s jeho odpovídajícím označením. Aplikace umožňuje virtuální připojení prostřednictvím zaškrtnutí políčka Virtual Connection. Tato funkce je užitečná v případě, že neexistuje žádné připojení k modulu. Když je zaškrtnuta volba Virtual Connection, všechny příkazy nadále fungují, jako by připojení k modulu existovalo, s výjimkou nahrávání firmwaru a aktualizace vyhledávací tabulky LUT (Look Up Table) [10, 18].

4.1.2 Režimy provozu

Uživatel je schopen prostřednictvím aplikace aktualizovat stav systému modulu. Ovládací prvky systému se nacházejí v rámci skupinového pole System Controls. Toto pole má nejen funkci ovládní, ale také informativní charakter, tzn. poskytuje informace o aktuálním provozním režimu modulu, zároveň umožňuje přepínání mezi těmito režimy. Přepínání provozního režimu modulu mezi normálním a pohotovostním režimem je zprostředkováno rádiovými tlačítky s popisky Normal a Standby. Další funkcí je softwarový reset, který je spustitelný kliknutím na tlačítko Reset.

V pohotovostním režimu dochází v rámci aplikace k pozastavení aktualizací stavu modulu. Obnovení aktualizací stavu se provede přepnutím do normálního režimu nebo softwarovým resetem. V případě hardwarového resetování musí být restartována aplikace, aby byla schopna rozpoznat návrat do normálního provozu. Pohotovostní režim vyžaduje dvouminutovou čekací dobu pro spuštění pracovního cyklu 50/50 a zaparkování DMD. Návrat do normálního režimu vyžaduje další tři vteřiny k dokončení všech operací. Po vydání příkazu pro přechod do pohotovostního režimu je jediným příkazem, který řídicí deska DLPC900 akceptuje, příkaz pro návrat do normálního režimu. Jakýkoli jiný příkaz může vést k neočekávanému chování. Konkrétně příkaz pro zaparkování nebo odparkování DMD není akceptován, dokud není obnoven normální režim.

V normálním provozním režimu má uživatel možnost specifikovat, v jakém zobrazovacím režimu bude modul provozován, tzn. jakým způsobem bude modul pracovat a jaký typ dat bude zpracovávat [10, 18].

Každý z těchto režimů má své vlastní funkce a použití, každý z nich může být přizpůsoben potřebám uživatele. Přepnutí modulu do jednoho ze čtyř zobrazovacích režimů je zprostředkováno rádiovými tlačítky, která jsou k dispozici v rámci skupinového pole Operating Mode. Dostupné zobrazovací režimy jsou Video Mode, Pre-stored Pattern Mode, Video Pattern Mode a Pattern On-The-Fly-Mode.

Video Mode je režim videa, který je primárně určen pro zobrazovací aplikace. Není doporučeno využívání tohoto režimu při zobrazovacích aplikacích, které vyžadují přesnost pixelů a časování. Tento režim umožňuje uživateli zvolení požadovaného vstupního zdroje – paralelní rozhraní RGB, interní generátor testovacích vzorů s deseti možnostmi testovacích vzorů, zobrazení obrazu vzoru z paměti flash, jednobarevný celoobrazovkový obraz s volitelnou barvou.

Pre-stored Pattern Mode je režim předem uložených vzorů, ve kterém uživatel může vytvořit sekvenci vzorů pomocí obrázků, které byly uživatelem nahrány do paměti flash.

Video Pattern Mode je režim vzorů videa, ve kterém může uživatel definovat sekvenci vzorů pomocí dat vzorů nebo videa, která jsou přenášena pomocí paralelního RGB rozhraní.

Pattern On-The-Fly Mode je režim vzorů za chodu, ve kterém může uživatel vytvořit sekvenci vzorů pomocí bitmapových obrázků, které jsou načteny do interní paměti řadiče DLPC900 pomocí rozhraní USB nebo I²C. Tento režim může být užitečný pro zobrazení, testování a ladění sekvence vzorů před tím, než jsou obrázky tvořící tuto sekvenci uloženy do flash paměti – aktualizace paměti flash pro použití režimu předem uložených vzorů může být časově náročný proces [10, 18].

4.1.3 Typ připojeného DMD

V rámci skupinového pole Chipset Type jsou zobrazeny typy čipové sady DLP, které jsou kompatibilní s řadičem DLPC900. Aplikace se dotazuje modulu DLP LightCrafter Dual DLPC900 EVM, resp. provádí automatický proces kontroly, pro určení typu DMD, pro který je firmware naprogramován a který má být připojen k modulu DLP LightCrafter Dual DLPC900 EVM. Skupinové pole Chipset Type je aktualizováno, tzn. zobrazuje, která čipová sada, resp. čip DMD, je očekávána pro použitý modul. Uživatel se musí ujistit, že naprogramovaný firmware v modulu odpovídá použitému čipu DMD [10, 18].

4.1.4 Stavové indikátory řadiče

Stavové informace o aktuálním stavu řadiče DLPC900 se nacházejí ve skupinovém poli Status. Tyto informace jsou reprezentovány zaškrťovacími políčky, každé má přiřazenou událost. Pokud je některé z políček zaškrtnuto, znamená to, že došlo k příslušné události. V případě, že je zaškrtnuto políčko indikující chybu, tak musí být vyskytující se chyba opravena před dalším používáním modulu. Popis jednotlivých stavových indikátorů je následující [10, 18]:

- **Internal Memory Test Passed** – řadič provede při zapnutí interní test systémové paměti. Pokud je pole zaškrtnuto, znamená to, že test proběhl úspěšně.

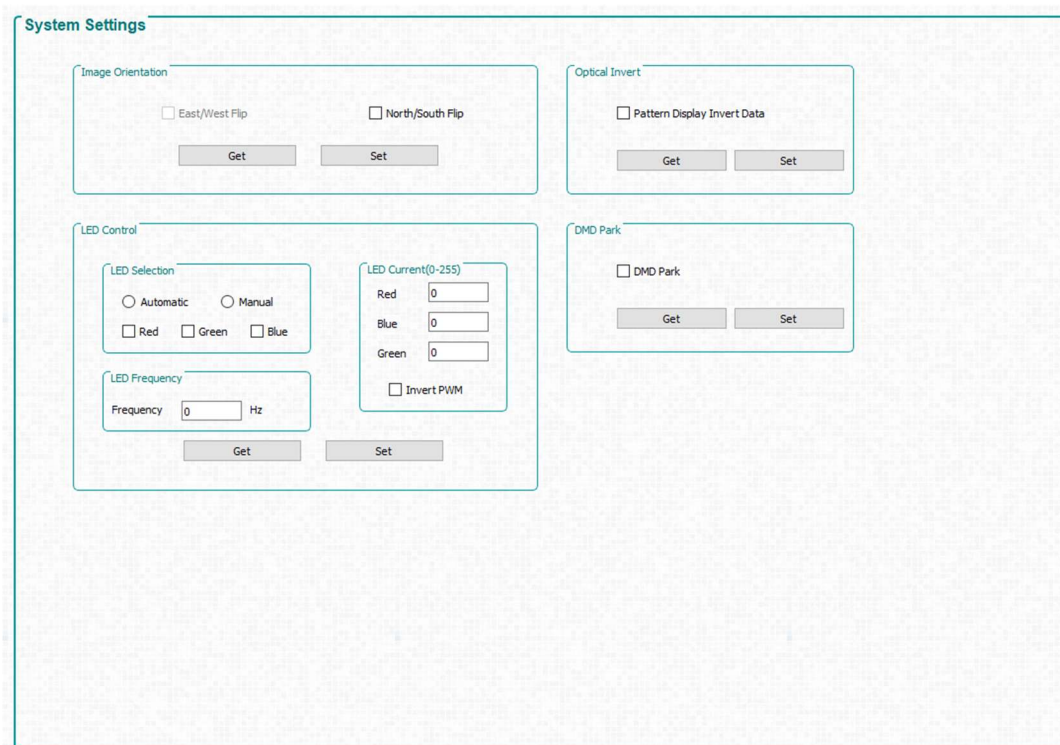
- **Controller/DMD Incompatible** – pro správné fungování modulu je důležité, aby byly hardware a software navzájem kompatibilní. Pokud je pole zaškrtnuto, znamená to, že je řadič nebo DMD nekompatibilní s firmwarem, tzn. načtením nesprávného firmwaru. Dalšími příčinami zaškrtnutí tohoto políčka může být problém v komunikaci mezi řadičem a DMD, tzn. chybějící, poškozené nebo nesprávně zapojené hardwarové komponenty, např. poškození vedení SCP, poškozené flex kabely, nesprávně usazený čip DMD v patici atp.
- **Secondary Present and Ready** – součástí modulu použitého v této diplomové práci je řídicí deska se dvěma řadiči DLPC900. Pokud je pole zaškrtnuto, znamená to, že sekundární řadič je přítomen a připraven. S ohledem na modul použitý v této diplomové práci by nezaškrtnutí tohoto políčka znamenalo, že jeden nebo oba řadiče nefungují správně. Další příčinou může být načtení nesprávného firmwaru, resp. nesprávné naprogramování pomocí souboru firmwaru pro modul využívající řídicí desky s jedním čipem.
- **Internal Initialization Complete** – při zapnutí se provádějí inicializační procedury, které jsou nutné ke správnému fungování modulu. Pokud je pole zaškrtnuto, znamená to, že všechny inicializační procedury byly úspěšně dokončeny.
- **DMD Reset Waveform Controller Error** – zaškrtnutím tohoto políčka je indikována chyba řídicí jednotky pro resetování DMD, která se vyskytuje v případě, že je detekováno více překrývajících se napájecích napětí nebo více resetovacích operací přistupujících ke stejnému bloku mikrozrcadel.
- **Forced Swap Error** – zaškrtnutím toho políčka je indikována vynucená výměna vyrovnávací paměti. K této chybě může dojít, pokud je modul nastaven na provoz v zobrazovacím režimu video a vertikální časování zadní vyrovnávací paměti je příliš malé. K chybě může dojít také v případě, že je modul nastaven na zobrazovací režim video vzorů, kdy jsou vzory načítány přes digitální zobrazovací rozhraní, a časování sekvence vzorů neodpovídá vertikální synchronizaci rozhraní – konkrétně jsou kumulativní expoziční časy větší než čas snímku. K nucené výměně vyrovnávací paměti může dojít také během kteréhokoli z režimů vzorů při přípravě sekvence vzorů a časování čtení stavu. Uživatel může být nucen provést další čtení stavu, aby získal správný stav tohoto ukazatele. Pokud je pole nadále zaškrtnuto, je nutné zkontrolovat, zda v sekvenci vzorů nedošlo k chybovému stavu.
- **Sequence Abort Status Flag** – pole je zaškrtnuto vždy, když došlo k přerušení sekvence. K přerušení sekvence může dojít během jakéhokoli zobrazovacího režimu vzorů při přípravě sekvence vzorů a časování čtení stavu. Pro získání správného stavu tohoto indikátoru může být zapotřebí dodatečné načtení stavu. Pokud je políčko nadále zaškrtnuté, zkontrolujte,

zda nedošlo k chybovému stavu v sekvenci vzorů. Zkontrolujte také, zda kumulativní expozice není delší než doba snímku.

- **Sequence Error** – pole je zaškrtnuto vždy, když došlo k chybě sekvence. Chyby sekvence se mohou vyskytnout během kteréhokoli zobrazovacího režimu vzorů při přípravě sekvence vzoru a časování čtení stavu. Uživatel může být nucen provést další čtení stavu, aby získal správný stav tohoto indikátoru. Pokud je pole nadále zaškrtnuté, zkontrolujte, zda nedošlo k chybovému stavu v sekvenci vzorů.
- **DMD Micromirrors Parked** – pole je zaškrtnuto vždy, když jsou mikrozrcadla DMD zaparkována.
- **Sequencer Running** – pole je zaškrtnuto vždy, když je sekvencer spuštěn.
- **Video Running** – pole je zaškrtnuto vždy, když video běží normálně.
- **Locked to External Source** – políčko je zaškrtnuto, pokud je modul uzamčen na externí paralelní zdroj videa RGB. Pokud modul kdykoli ztratí uzamčený signál, zaškrtnutí políčka se zruší. Pro přepnutí do zobrazovacího režimu video vzorů musí být přítomen uzamčený zdroj.

4.1.5 Panel nastavení systému

Kliknutím na tlačítko System Settings umístěné v horní části aplikace se zobrazí panel System Settings (viz Obr. 17) pro ovládání systémových nastavení. V rámci tohoto panelu je uživateli umožněno ovládat různé aspekty projekce obrazu, a to orientaci obrazu, LED diody a optickou inverzi [10, 18].



Obr. 17: Panel nastavení systému

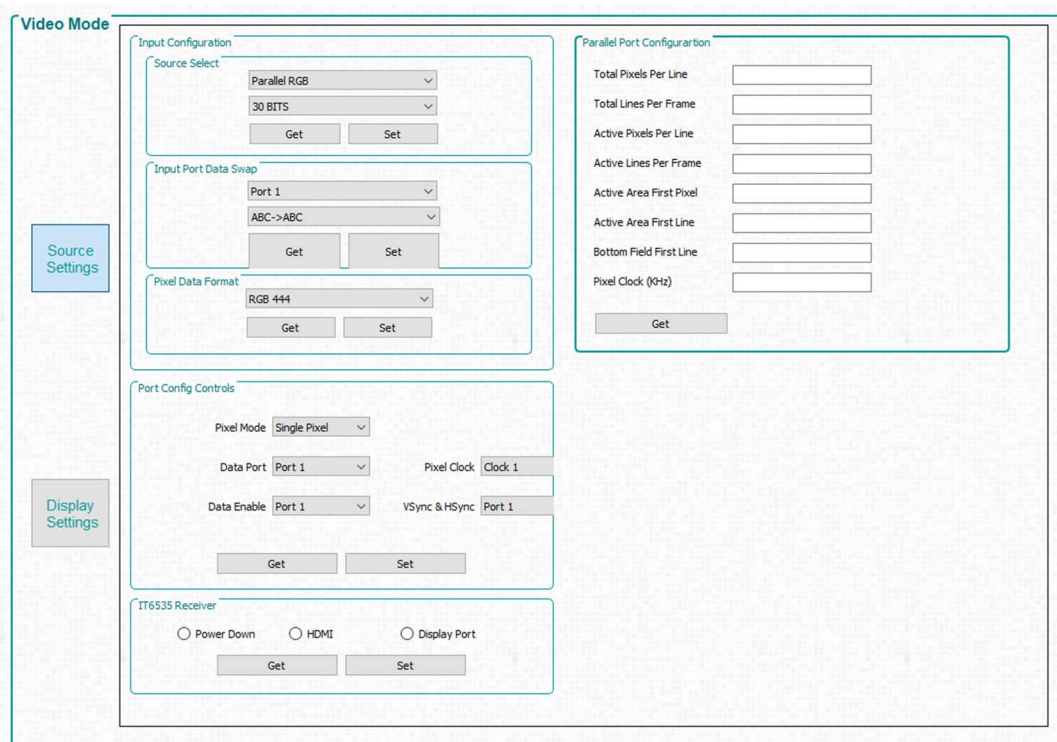
- **Image Orientation** – v závislosti na orientaci promítaného obrazu může být vyžadováno převrácení obrazu vzhledem k jeho krátké nebo dlouhé ose.
 - **East/West Flip** – převrácení obrazu vzhledem k jeho dlouhé ose je označeno jako nastavení východ/západ. S ohledem na modul použitý v této diplomové práci je toto nastavení trvale zapnuto, a to z důvodu přítomnosti řídicí desky se dvěma radiči. Dalším požadavkem je obrácení obrazových dat vzorů, resp. videa, před jejich načtením, resp. streamováním.
 - **North/South Flip** – převrácení obrazu vzhledem k jeho krátké ose je označeno jako nastavení sever/jih. Pokud uživatel chce aplikovat toto nastavení, musí provést jeho zapnutí před tím, než bude provedeno odeslání vzorů v rámci vyhledávací tabulky, zároveň běh sekvence vzorů musí být zastaven.
- **LED Control** – řízení LED diod umožňuje uživateli manuální ovládání jejich stavu, popř. přenechat jejich ovládání interním sekvenceru radiče. Pokud jsou LED diody při manuálním ovládání vypnuty, je třeba je před přepnutím na automatické ovládání interním sekvencerem povolit. Nastavení LED Current ovládá proud procházející diodami. Proud LED reguluje jas LED diod. Nastavení Invert PWM způsobí, že proudy LED budou mít při změně proudu opačný účinek na LED, tzn. nastavením Invert PWM se změní polarita PWM signálu. Nastavením LED Frequency je definována hodnota frekvence. Při manipulaci s frekvencí a proudem LED je nejlepší považovat hodnotu proudu LED v rozsahu 0–255 (0,39 % na krok) za pracovní cyklus, kde 255 se rovná přibližně 100 % (99,61 %). Interní software pak vypočítá hodnotu PWM v závislosti na nastavené frekvenci a pracovním cyklu.
- **Pattern Display Invert Data** – tímto nastavením je uživateli umožněno invertování dat do DMD. Pokud uživatel chce aplikovat toto nastavení, musí provést jeho zapnutí před tím, než bude provedeno odeslání vzorů v rámci vyhledávací tabulky, zároveň musí být běh sekvence vzorů zastaven. Toto nastavení není aplikovatelné v zobrazovacím režimu videa.
- **DMD Park** – tímto nastavením je umožněno uživateli zaparkovat a odparkovat DMD. Izolované použití tohoto nastavení není doporučeno s výjimkou ladění. Pokud je režim zobrazení nastaven na režim předem uložených vzorů, režim video vzorů nebo režim vzorů za chodu, musí být před použitím tohoto nastavení sekvence vzorů zastavena.

4.1.6 Panel režimu videa

Kliknutím na tlačítko Video Mode umístěné v horní části GUI se zobrazí panel Video Mode pro ovládání režimu videa. Panel Video Mode se skládá ze dvou karet, a to ze Source Settings, kde jsou přítomna nastavení pro vstupní zdroje modulu, a Display Settings, která obsahuje nastavení pro zobrazení [10, 18].

Karta nastavení zdroje

Karta nastavení zdroje (Obr. 18) poskytuje různé ovládací prvky, které umožňují uživateli konfigurovat vstupní zdroj modulu při provozu v režimu videa [10, 18].



Obr. 18: Panel režimu videa – karta nastavení zdroje

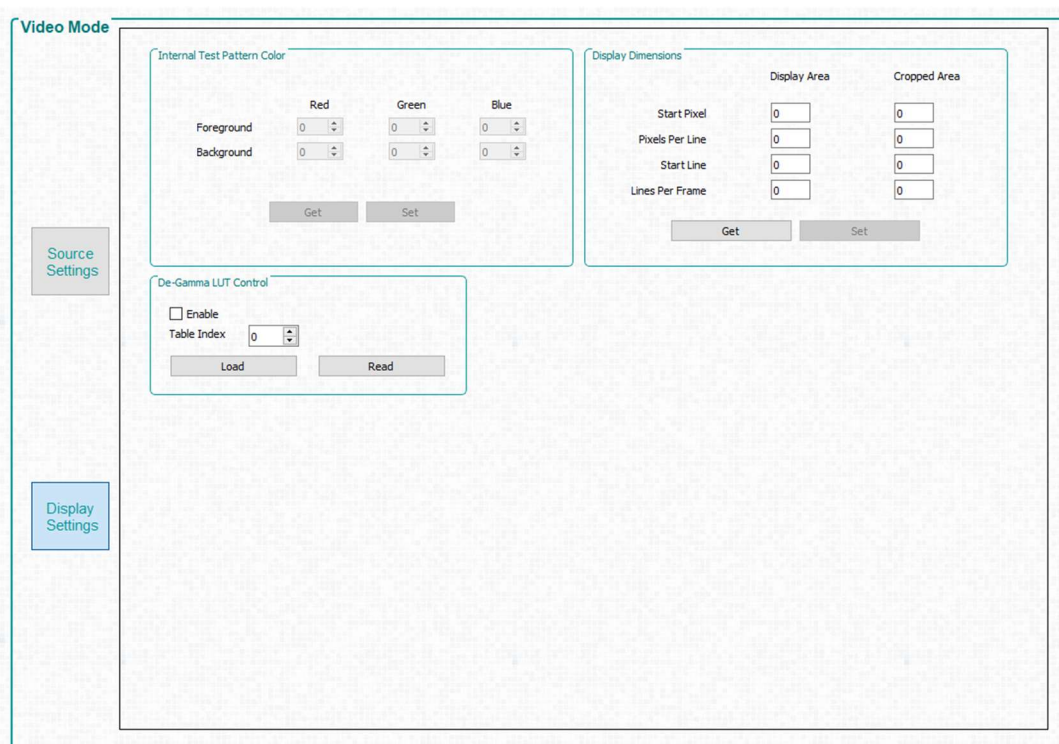
- **Input Configuration** – tento ovládací prvek umožňuje uživateli nakonfigurovat vstupní zdroj modulu. K dispozici jsou tyto možnosti:
 - **Source Select** – tento ovládací prvek umožňuje uživateli zvolit vstupní zdroj. Dostupnými možnostmi vstupního zdroje jsou paralelní rozhraní RGB, interní generátor testovacích vzorů, obrázky vzorů z paměti flash a konstantní jednobarevný obraz (včetně černé a bílé).
 - **Input Port Data Swap** – tento ovládací prvek umožňuje prohození/výměnu dat vstupního portu. V závislosti na směrování paralelních datových linek RGB může být nutné prohodit pořadí barevných kanálů. Modul vyžaduje nastavení ABC → BAC, kde ABC odpovídá RGB. Toto nastavení znamená, že pořadí kanálů se změní tak, že kanály R a G jsou prohozeny. Uživatel může také vybrat, na který port se má nastavení použít.
 - **Pixel Data Format** – tento ovládací prvek umožňuje uživateli zvolit formát dat pixelů, resp. formát videa vstupního zdroje.
- **Port Config Controls** – tento ovládací prvek umožňuje konfiguraci portu. V závislosti na tom, jaké vstupní signály byly zvoleny při návrhu desky, může být nutné zvolit příslušné signály, aby řadič správně detekoval

příchozí zdroj videa. Pokud je zvoleno nesprávné nastavení, může se zobrazit konstantní jednobarevný obraz nebo může být obraz nesprávný. Režim pixelu lze také nastavit na Single Pixel nebo Dual Pixel. Režim Dual Pixel umožňuje vyšší rychlost přenosu dat načítáním dvou pixelů na hodinový signál namísto jednoho pixelu na hodinový signál.

- **IT6535 Receiver** – tento ovládací prvek umožňuje volbu mezi vstupními konektory HDMI nebo DisplayPort digitálního přijímače IT6535. Digitální přijímač lze také vypnout, čímž se ztrojnásobí všechny výstupní signály IT6535 a umožní se jinému zařízení sdílet vstupní porty a synchronizaci řadiče.
- **Pixel Port Configuration** – tento ovládací prvek umožňuje zpětné načtení aktuálních parametrů konfigurace paralelního portu určených pomocí EDID nebo uživatelského nastavení rozměrů displeje.

Karta nastavení zobrazení

Karta nastavení zobrazení (viz Obr. 19) poskytuje ovládání barev popředí a pozadí vybraného testovacího vzoru. Mezi obecná nastavení patří transformace obrazu a konfigurace faktoru gama [10, 18].



Obr. 19: Panel režimu videa – karta nastavení zobrazení

- **Internal Test Pattern Color** – pokud je jako vstupní zdroj vybrán interní testovací vzor, pak lze tímto ovládacím prvkem změnit barvy popředí a pozadí zvoleného testovacího vzoru.

- **Display Dimensions** – tento ovládací prvek umožňuje uživateli měnit měřítko nebo ořezávat obraz příchozího zdroje videa.
- **De-Gamma LUT Control** – tento ovládací prvek je podporován pro verzi firmwaru 6.x. Umožňuje zapnutí a vypnutí gamma korekce a zvolení jednoho z pěti předdefinovaných gamma nastavení.

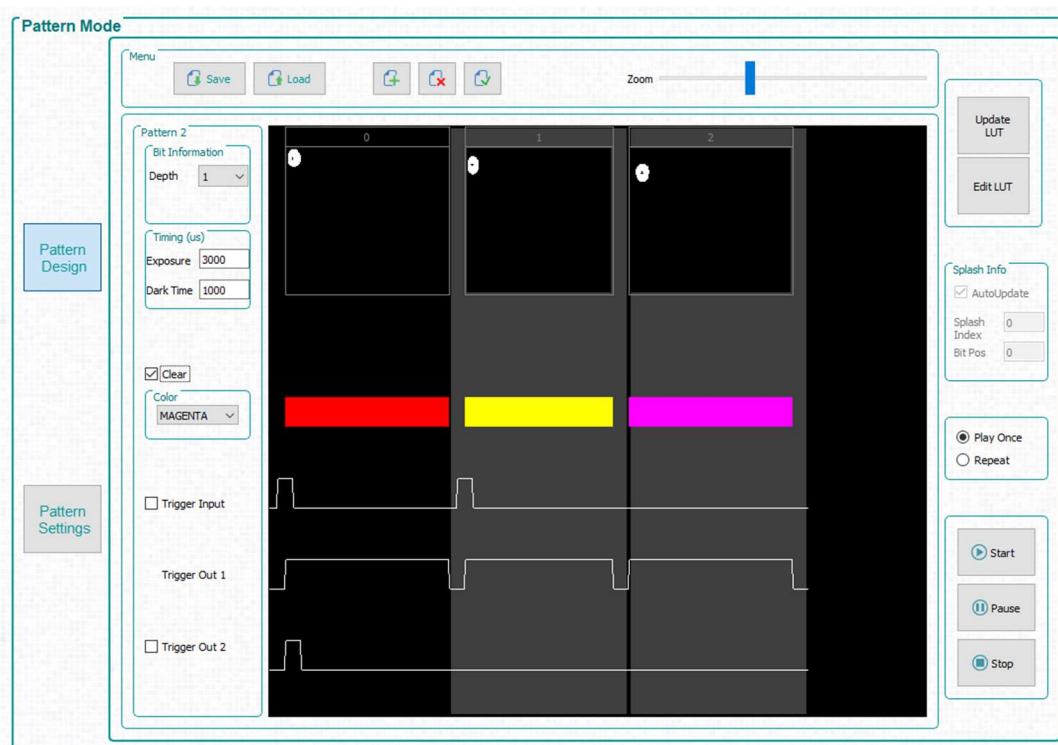
4.1.7 Panel režimu vzoru

Kliknutím na tlačítko Pattern Mode umístěné v horní části GUI se zobrazí panel Pattern Mode pro ovládání režimů vzoru. Panel Pattern Mode se skládá ze dvou karet, a to ze Pattern Design, kde je uživateli umožněno vytvoření sekvence vzorů, a Pattern Settings, která obsahuje nastavení např. pro konfiguraci signálů vstupních a výstupních spouští, ovládání zpoždění signálu pro LED a dalších.

Karta Pattern Mode je popsána v následující části, a to nikoli prostřednictvím obecného popisu, ale na příkladu vytváření sekvence vzorů [10, 18].

Vytvoření sekvence vzorů v režimu vzoru za chodu

V této části je popsán postup vytváření vzorové sekvence v režimu vzorů za chodu. Postup zahrnuje provedení sady kroků, které zahrnují výběr a přidání bitmapových obrázků, nastavení vlastností vzorů a nahrání definice sekvence vzorů do DLPC900. Následující příklad zahrnuje vytvoření jednoduché vzorové sekvence pomocí tří snímků (viz Obr. 20) [10, 18].



Obr. 20: Panel režimu vzoru – karta návrhu vzoru – příklad jednoduché sekvence vzorů

1. **Ověření správné funkčnosti vyhodnocovacího modulu** – radiové tlačítko Connected svítí zeleně, ve skupinovém poli Status není zaškrtnuta položka signalizující chybu a ve skupinovém poli Systém Controls je vybráno radiové tlačítko Normal.
2. **Přístup k režimu vzorů za chodu** – přístup k vybraní provozního režimu je umožněn za předpokladu, že je modul v normálním provozu. Ve skupinovém rámečku Operating Mode se zvolením radiového tlačítka Pattern On-The-Fly Mode přepne provozní režim modulu do režimu vzorů za chodu a načte se panel Pattern Mode. Kliknutím na tlačítko Pattern Design se zobrazí velký černý panel.
3. **Přidání bitmapových obrázků** – obrázky by měly být vybrány z příslušné složky daného vyhodnocovacího modulu⁴. Kliknutím na tlačítko Add Pattern na panelu Menu lze provést výběr více obrázků najednou, ale nemusí být načteny ve stejném pořadí, v jakém byly vybrány. Aby bylo zajištěno požadované pořadí, lze pomocí tlačítka Load načíst obrázky z textového souboru, který obsahuje názvy souborů jednotlivých bitmap. Alternativně lze tlačítko Add Pattern použít k postupnému přidávání obrázků. Po přidání obrázků se na původně černém panelu zobrazí jednotlivé vzory.
4. **Výběr vzorů** – po přidání obrázků lze každý vzor vybrat jednotlivě nebo provést výběr více vzorů najednou. Pro výběr více vzorů v sérii lze použít kombinaci kláves Shift+kliknutí. Pro výběr více vzorů, které nejsou v sérii, lze použít kombinaci kláves Ctrl+kliknutí. Alternativní metodou pro výběr všech vzorů je použití tlačítka Select All Patterns na panelu Menu.
5. **Nastavení vlastností vzorů** – každý vzor musí mít nastaveny specifické vlastnosti, jako je bitová hloubka, doba expozice, doba stmívání a barva. Za předpokladu, že je požadavkem ovládání sekvence vzorů vnějším signálem, popř. ovládání externích zařízení sekvencí vzorů, je možné povolit/zakázat vstupní a výstupní spínače každému vzoru.
6. **Výběr možností sekvence vzorů** – sekvenci vzorů lze nakonfigurovat buď na nepřetržité opakování výběrem přepínače Repeat, nebo na jednorázové přehrávání výběrem přepínače Play Once.
7. **Nahrání definice sekvence vzorů** – kliknutím na tlačítko Update LUT se nahraje definice sekvence vzorů včetně obrazů vzorů do DLPC900. Během nahrávání se zobrazí zelený stavový řádek, který signalizuje průběh. Pokud se v sekvenci vzorů vyskytnou chyby, zobrazí se chybové hlášení. Signalizace průběhu nahrávání se zobrazuje pouze při přidávání nových vzorů do interní paměti DLPC900.
8. **Spuštění a ovládání sekvence vzorů** – spuštění/pozastavení/zastavení sekvence je provedeno kliknutím na tlačítko Start/Pause/Stop. Po

⁴ C:\Texas Instruments-DLP\DLPC900REF-SW-5.1.0\DLPC900REF-SW-5.1.0\DLPC900REF-GUI\Images and Batch files\LCR9000_Images

pozastavení sekvence se tlačítkem Start spustí sekvence od místa, kde byla pozastavena. Po zastavení sekvence se tlačítkem Start spustí sekvence od začátku.

Karta nastavení vzoru

Karta nastavení vzoru (viz Obr. 21) umožňuje konfiguraci výstupních a vstupních spouštěčů – zpoždění výstupních spouštěčů Trigger Out 1 a Trigger Out 2, a také zpoždění vstupních spouštěčů Trigger In 1 a Trigger In 2. Zpoždění mohou být také ovládací prvky LED. Všechny signály lze invertovat. Tato zpoždění jsou od začátku každého vzoru na DMD [10, 18].

Obr. 21: Panel režimu vzoru – karta nastavení vzoru

- **DMD Active Blocks** – umožňuje aktivovat podmnožinu bloků DMD. Mikrozcadla v nevybraných blocích jsou nastavena do vypnutého stavu. Při práci s podmnožinami bloků DMD je doporučeno využívání režimu nečinnosti tak často, jak je to jenom možné.
- **Minimum LED Pulse Width** – řízení minimální šířky pulzů LED umožňuje systému mnohem vyšší rychlost zobrazování vzorů. Zadáním minimální šířky pulzu LED, která je specifická pro zvolený osvětlovací systém, je umožněno vyšších rychlostí vzorů pomocí modulace osvětlení. Modulace osvětlení probíhá u 8bitových vzorů rychlostí vyšší než 1031 Hz, a to tak, že se modulováním světelného zdroje zkracují nejkratší bity, čímž se zvyšuje maximální rychlost vzoru.

- **DMD Idle Mode** – režim nečinnosti DMD zajišťuje pracovní cyklus 50/50 v celé soustavě mikrozrcadel DMD, přičemž zrcadla jsou přepínána mezi zapnutým a vypnutým stavem, aby se optimalizoval výkon zrcadel.
- **Image Compression** – volba komprese obrazu umožňuje ovládat typ komprese, který se vyskytuje u obrazů vzoru.
 - **Uncompressed** – se nepokouší obrázky komprimovat.
 - **RLE** – kódování délkou běhu je bezeztrátová metoda komprese, která komprimuje data vzoru pomocí horizontální podobnosti pixelů.
 - **Enhanced RLE** – vylepšené kódování délkou běhu je bezeztrátová kompresní metoda, která komprimuje data vzoru pomocí vertikálních a horizontálních podobností pixelů.
 - **Auto** – provádí porovnání všech výše zmíněných typů komprese a vybere metodu, která zabírá nejmenší množství dat.
- **Trigger Control** – poskytuje nastavení pro zpoždění výstupních a vstupních spouštěčů, popř. invertování jejich signálů. U výstupních spouštěčů je možné nadefinovat zpoždění náběžné a sestupné hrany signálů. Všechny hodnoty zpoždění jsou zadávány ve formě mikrosekund.
- **LED Delays Controls** – nastavuje zpoždění LED prvků. Zpoždění jsou definována jako zpoždění náběžné nebo sestupné hrany pro červenou LED, zelenou LED a modrou LED. Všechny hodnoty zpoždění jsou zadávány ve formě mikrosekund a je možné provést invertování těchto signálů.

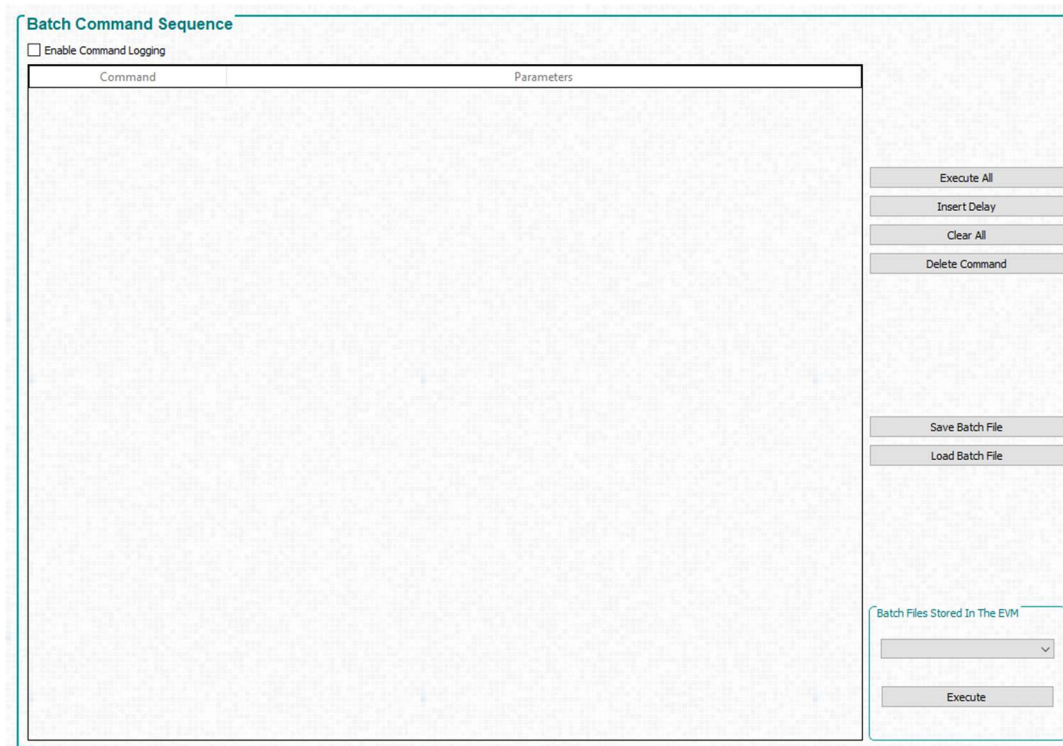
4.1.8 Panel sekvence dávkových příkazů

Kliknutí na tlačítko Batch Files umístěné v horní části aplikace se zobrazí panel Batch Command Sequence (viz Obr. 22). Při zaškrtnuté možnosti Enable Command Logging se povolí protokolování příkazů – zaznamenávají se všechna kliknutí uživatele v GUI, a to ve formě příkazů a odpovídajících dat.

Tento záznam je zobrazen na panelu. Uložení tohoto záznamu se provede prostřednictvím tlačítka Save Batch File. Uložený soubor je ve formátu textového souboru obsahujícího deskriptor příkazu a příslušná data příkazu. Tento soubor lze později opětovně načíst pomocí tlačítka Load Batch File. Tento soubor obsahuje záznam kroků provedených uživatelem, tzn. repetitivní posloupnosti akcí mohou být nahrazeny spuštěním těchto tzv. dávkových souborů. Zároveň tyto dávkové soubory mohou být přímo uloženy do firmwaru vyhodnocovacího modulu. Přehled všech dávkových souborů uložených ve firmwaru je uveden ve skupinovém rámečku Batch Files Stored In The EVM.

Firmware DLPC900 má možnost ukládat dávkové soubory v rámci firmwaru. Tyto dávkové soubory obsahují příkazy, které se provádějí za účelem provedení určité sekvence nastavení, aniž by tyto příkazy prováděl uživatel nebo hostitel. Pokud firmware obsahuje dávkové soubory, GUI se dotáže na názvy dávkových souborů a vypíše je v rámci výběrového seznamu ve skupinovém rámečku Batch File In The EVM. Tyto

dávkové soubory mohou být spuštěny uživatelem. Dalším možným využitím těchto dávkových souborů je definování výchozího dávkového souboru – určité posloupnosti akcí, které se mají vykonat během sekvence zapnutí DLPC900 při připojení napájení [10, 18].



Obr. 22: Panel sekvence dávkových příkazů

Propojení panelu sekvence dávkových příkazů s ostatními prvky GUI umožňuje např. vytvoření/nahrání sekvence vzorů v režimu vzoru za chodu. Následující příklad popisuje nahrání dávkového souboru, který obsahuje všechny potřebné příkazy a komprimované obrázky [10, 18].

1. **Příprava pro načtení sekvence vzorů dávkovým souborem** – před načtením dávkového souboru je nutné zastavit sekvenci vzorů, pokud je spuštěna. Kliknutím na tlačítko Batch Files, v horní části GUI, se zobrazí stejnojmenný panel. V tomto panelu se zaškrtnutím políčka Enable Command Logging povolí protokolování příkazů. Pokud se v panelu nachází jakýkoliv obsah, je nutné provést jeho vymazání tlačítkem Clear All.
2. **Načtení a spuštění sekvence vzorů dávkovým souborem** – ukázkový dávkový soubor onthefly.txt by měl být vybrán ze stejné složky jako bitmapové obrázky v příkladu z kapitoly 4.1.7. Načtení dávkového souboru se provede tlačítkem Load Batch File a jeho spuštění tlačítkem Execute All. Po spuštění se ovládání sekvence vzorů provádí v panelu Pattern Mode, v záložce Pattern Design, a to tlačítka Start/Pause/Stop.

4.1.9 Panel periferních zařízení

Kliknutím na tlačítko Peripherals umístěné v horní části aplikace se zobrazí panel Peripherals (viz Obr. 23) [10, 18].

The screenshot displays the 'Peripherals' control panel, which is organized into several functional sections:

- I2C Settings:** Includes dropdowns for 'I2C Port' (set to Port 1) and 'Addressing Mode' (set to 7-Bit), and a text input for 'Clock Rate (Hz)' (set to 100000). It features 'Get' and 'Set' buttons.
- I2C Read / Write:** Contains dropdowns for 'I2C Port' (Port 1) and 'Device Address (hex)', along with text inputs for 'Write Data (hex)', 'Read Data (hex)', and 'Bytes to Read' (0). It includes 'Read' and 'Write' buttons.
- Clock A Configuration:** Features an 'Enable' checkbox and a 'Clock Divisor' text input, with 'Get' and 'Set' buttons.
- GPIO Configuration:** Includes dropdowns for 'GPIO Pin Select' (GPIO 0), 'Output State' (Pin Low), 'Direction' (Input), and 'Output Type' (Normal). It has 'Get' and 'Set' buttons.
- Pulse Width Modulated (PWM) Control:** Contains an 'Enable' checkbox, a 'PWM Channel Select' dropdown (set to PWM Channel 0 (GPIO 0)), a 'Clock Period' text input (with 'us' unit), and a 'Duty Cycle %' text input. It includes 'Get' and 'Set' buttons.
- Busy GPIO:** Features an 'Enable' checkbox and a 'GPIO Pin Select' dropdown (set to GPIO 0), with 'Get' and 'Set' buttons.

Obr. 23: Panel periferních zařízení

- **I²C** – v rámci skupinového rámečku I²C je umožněno ovládání externích zařízení I²C pomocí jednoho z rozhraní I²C přítomných na vyhodnocovacím modulu. Pokud například ovladač LED vyžaduje komunikaci I²C pro zapnutí LED diod, pak lze pomocí tohoto rozhraní poslat příkaz ovladači LED.
 - **I²C Settings** – umožňuje konfiguraci a volbu I²C portu, typ adresovacího režimu a hodnotu hodinového taktu v Hz.
 - **I²C Read/Write** – umožňuje provedení přenosu dat přes rozhraní I²C. Ukázka způsobu komunikace je popsána v podkapitole 3.1.
- **Clock A Configuration** – umožňuje povolení a konfiguraci výstupního hodinový signálu OCLKA. Hodinový signál může být použit jako zdroj signálu pro uživatelem vyžadovanou externí logiku.
- **GPIO Configuration** – skupinové pole pro konfiguraci GPIO umožňuje uživateli nakonfigurovat kterýkoli z devíti dostupných GPIO. Tyto GPIO lze nakonfigurovat jako vstupy nebo výstupy.
- **Pulse Width Modulated (PWM) Control** – pole skupiny pro řízení pulzně šířkové modulace umožňuje uživateli konfigurovat některý ze čtyř dostupných PWM výstupů.

4.1.10 Panel firmwaru

Kliknutím na tlačítko Firmware umístěné v horní části aplikace se zobrazí panel Firmware (viz Obr. 24). Prostřednictvím tohoto panelu je umožněno aktualizovat verzi firmwaru, nahrát do firmwaru uživatelem definované vzory nebo dávkové soubory a nastavit podmínky spuštění.

Před nahráním firmwaru je nutné zkontrolovat, že vyhodnocovací modul je zapnutý a pracuje normálně, dále zda bylo úspěšně zprostředkováno spojení mezi modulem a aplikací GUI. Pro aktualizaci firmwaru je potřeba stáhnout kompatibilní firmware ze stránek výrobce. Kliknutím na tlačítko Browse se otevře průzkumník souborů pro vyhledání požadovaného firmwaru. Po vyhledání a zvolení požadovaného souboru firmwaru se kliknutím na tlačítko Upload provede aktualizace firmwaru.

Ve skupinovém rámečku Power up Defaults se provádí konfigurace výchozího stavu napájení, kde je umožněno vybrání výchozí stav zapnutí zaškrtnutím políčka Start up State, a následně vybráním požadovaného stavu z rozevřacího seznamu. Pokud je v hardwaru přítomen digitální přijímač IT6535, může uživatel povolit použití tohoto přijímače zaškrtnutím políčka HDMI/DP Receiver.

Obecně je doporučeno zaměřit se před pokročilejší konfigurací jednotlivých nastavení firmwaru na datové listy a programátorské příručky pro získání bližších informací o těchto nastaveních [10, 18].

Obr. 24: Panel firmwaru

5 ANALÝZA PROBLEMATIKY

Vyhodnocovací modul DLP LightCrafter 9000 EVM, který je objektem zájmu praktické části diplomové práce, poskytuje pro aplikace se strukturovaným světlem vysokorychlostní zobrazování vzorů. V kapitole 2 jsou zmíněny dosažitelné rychlosti zobrazování vzorů v závislosti na technických specifikacích modulu – cílem je dosažení vysokorychlostního zobrazování binárních vzorů, a to až při rychlosti 9523 Hz.

Ovládání modulu je zprostředkováno přes komunikační rozhraní I²C nebo USB. Pro praktickou část bylo, dle požadavku vedoucího laboratoře, zvoleno komunikační rozhraní USB, které poskytuje snadné propojení modulu s PC. Popis příkazového řídicího rozhraní USB je v podkapitole 3.2.

Příkazové řídicí rozhraní vychází z informací dostupných z programátorské příručky DLPC900 Programmer's Guide. Součástí této příručky jsou informace o podporovaných příkazech. Data příkazu jsou dána definicí příkazu, pomocí které jsou požadovaná data sestavována řadičem při odesílání dat hostitelskému PC, nebo naopak.

Aplikace GUI, která je popsána v kapitole 4, poskytuje dodatečné informace o jednotlivých příkazech, včetně jejich definic – podporované rozsahy hodnot parametrů jednotlivých příkazů. Osvojení si práce s aplikací umožňuje získání doplňkových informací a zároveň ověření poznatků získaných z programátorské příručky.

Teoretický popis principu fungování komunikačních protokolů, který je popsán v podkapitole 3.2, se shoduje s poznatky získanými během používání aplikace a také se shoduje s ukázkovým zdrojovým kódem, který je dostupný v rámci sady pro vývoj softwaru SDK (Software Development Kit).

K vytvoření plnohodnotné a funkční knihovny v programovacím jazyce Python je nutné použít nástroje ke zpětné analýze způsobu komunikace mezi vyhodnocovacím modulem a aplikací GUI. SDK je naprogramováno v programovacím jazyce C/C++, z tohoto důvodu je nezbytné získat pokročilé znalosti o principech a zákonitostech tohoto programovacího jazyka – správná integrace knihovny zajišťující komunikaci přes rozhraní USB.

5.1 Analýza komunikace mezi modulem a hostitelským PC

Aplikace GUI i požadovaná knihovna vytvořená v rámci praktické části diplomové práce sdílí společný způsob komunikace mezi vyhodnocovacím modulem a PC, a to přes rozhraní USB.

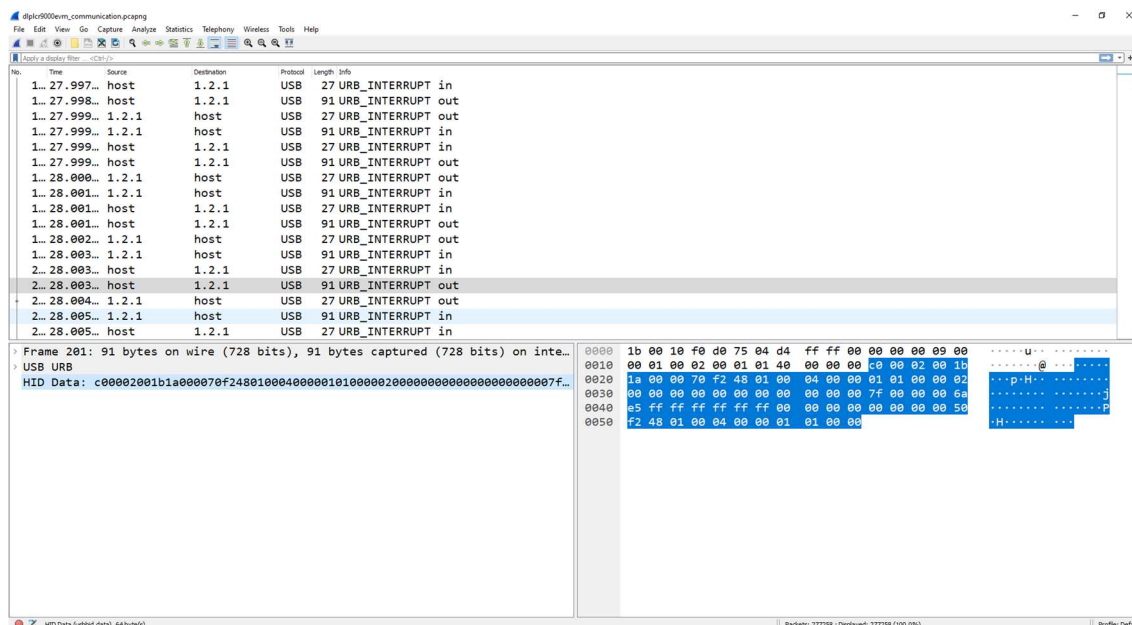
Akce vykonané v aplikaci GUI jsou vnímané jako posílání příkazů s příslušnými daty – transakční sekvence příkazů USB pro čtení a zápis, které byly zmíněny v podkapitolách 3.2.1 a 3.2.2.

Vytvořením vzorového příkladu v aplikaci GUI – vytvoření sekvence vzorů v režimu vzoru za chodu – je možné zachytávat výměny dat mezi aplikací a modulem. K tomuto zachycení a následné analýze komunikace mezi PC/aplikací a modulem je

použit analyzátor síťových protokolů Wireshark (viz Obr. 25). Na základě získaných dat z analyzátoru Wireshark, společně s porozuměním ukázkového zdrojového kódu z SDK, byly nalezeny následující poznatky:

- Interní vyrovnávací paměť příkazů DLPC900 je sdílena mezi oběma operacemi čtení a zápisu. V případě více přenosové zápisové transakce – odesílání digitálních obrazových dat bitmapových obrázků – při které je posíláno více bajtů než 512 bajtů – musí být celá transakce rozdělena do bloků o velikosti 512 bajtů. V každém bloku musí být specifikována hlavička zprávy, přestože se jedná o stejnou operaci se stejným příkazem.
- Kvůli sdílené interní vyrovnávací paměti příkazů mezi operacemi čtení a zápisu, je velikost transakce čtení (zpráva s hlavičkou, příkazem a popř. parametry) limitována velikostí paketu, aby nedošlo k přepsání dat v paměti, a tedy byla získána odpověď z modulu.
- Každý blok zprávy je rozdělen a odeslán v paketech o velikosti 64 bajtů. Do velikosti paketu se nezapočítává nulový bajt ID zprávy. Každý paket musí mít velikost 64 bajtů, jinak se musí provést jeho rozšíření o nulové bajty.
- V každé zprávě, nikoli paketu, musí docházet k inkrementaci hodnoty sekvenčního bajtu.
- Identifikátory pro nalezení a připojení k modulu prostřednictvím USB jsou dány výrobcem a produktem – VENDOR ID = 0x0451 a PRODUCT ID = 0xC900.
- Přítomnost dvou řadičů, kde každý z nich ovládá polovinu (1280x1600) čipu DMD, limituje sadu použitelných příkazů. Především se jedná o příkazy pro škálování, ořezávání a překlopení přes dlouhou osu (vodorovné překlopení).
- Princip ovládání každé poloviny čipu DMD jedním řadičem ovlivňuje příkazy pro inicializaci a nahrávání digitálních obrazových dat. Příkazy související s těmito operacemi musí být provedeny dvakrát – provedení stejné operace jak na primárním, tak na sekundárním řadiči.

Používáním aplikace GUI je zjištěno, že umožňuje vysokorychlostní zobrazování binárních masek, které je deklarováno výrobcem (viz podkapitola 2.2.2). Testováním různých rychlostí a konfigurací při zobrazování binárních masek pomocí aplikace GUI, jsou získány nejen podporované rozsahy parametrů, ale i reprezentace těchto parametrů v sekvenci bajtů při komunikaci přes rozhraní USB (záznam z aplikace Wireshark). Díky těmto informacím je umožněna nejen validace hodnot příkazů a jejich definic, ale i rozšíření znalostí o principu komunikace s vyhodnocovacím modulem.



Obr. 25: Zachycená komunikace mezi aplikací GUI a modulem prostřednictvím analyzátoru Wireshark – testování rychlosti zobrazení binárních masek

5.2 Zpracování obrazových dat binárních masek

Binární obrázky/masky jsou digitálními reprezentacemi obrázků/masek, kde každý pixel může nabývat pouze jedné ze dvou barevných hodnot, a to černé, nebo bílé. Černá barva je obvykle reprezentovaná jako 0 nebo nepravda. Bílá barva je obvykle reprezentovaná jako 1 nebo pravda. Varianty 0/nepravda a 1/pravda jsou dány datovým typem, který datová struktura využívá pro digitální reprezentaci binárního obrazu/masky.

V binárních obrazech/maskách odpovídá pozice každého pixelu diskretnímu místu v obrazové mřížce a hodnota pixelu je 0/nepravda, nebo 1/pravda. Pro lepší vizualizaci si lze představit 2D pole o rozměrech např. 2560x1600, kde každý element tohoto pole je pixel nabývající hodnoty 0/nepravda, nebo 1/pravda.

Binární masky se využívají k definování oblastí zájmů v rámci celého obrázku, tzn. provádění selektivních operací v obrázcích za účelem získání informací o přítomnosti/nepřítomnosti specifického prvku/objektu v odpovídajících oblastech pixelů.

V souvislosti s technologií DLP představují pixely o hodnotě 0/nepravda vypnutý stav mikrozrcadla, zatímco 1/pravda zapnutý stav. Binární masky jsou nositeli informací o stavu každého mikrozrcadla v rámci celého pole mikrozrcadel čipu DMD. Čipová sada DLP umožňuje převedení binárních masek do podoby světelných vzorů, které jsou promítány na objekt zájmu.

V rámci podkapitoly 2.2.1 bylo zmíněno, že řadič přijímá na vstup 16, 20 nebo 24bitová data RGB a zároveň že je schopen předem načíst až 400 1bitových binárních vzorů (400 binárních masek). S ohledem na požadovaný formát digitálních obrazových dat a paměťová omezení je nutné použít algoritmy pro slučování binárních masek,

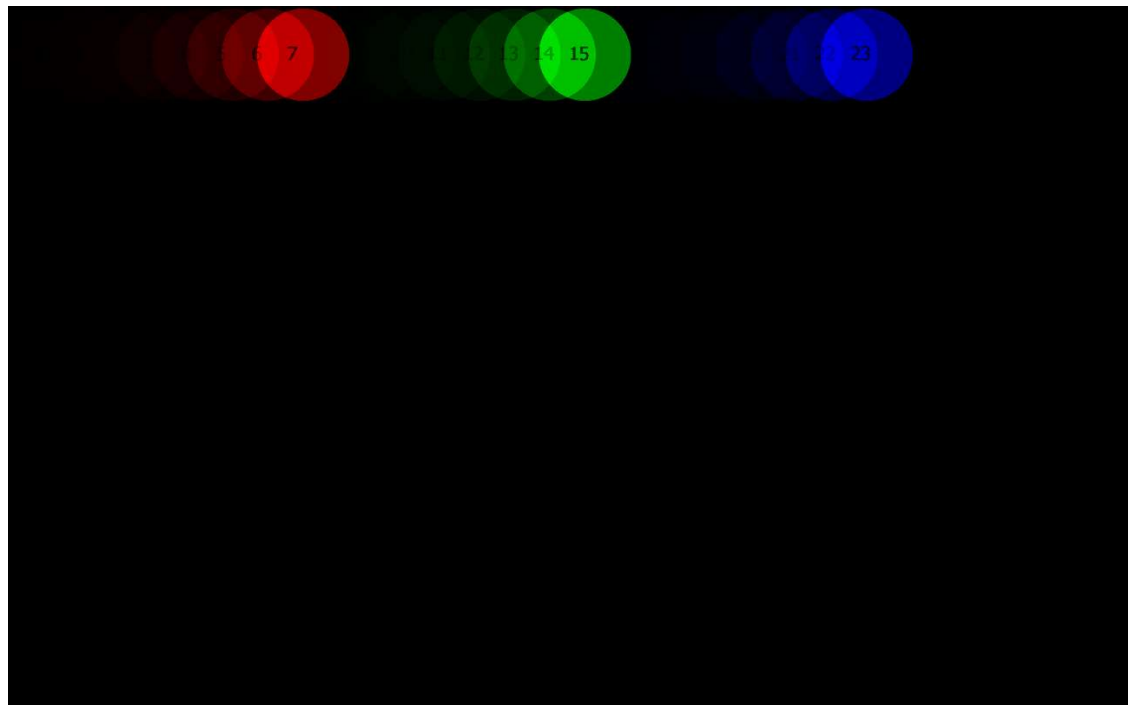
zároveň i pro jejich kompresi. Všechny algoritmy musí splňovat náležitosti popsané v programátorské příručce DLPC900 Programmer's Guide.

5.2.1 Převedení binárních masek do 24bitového RGB obrázku

Na vstupu jsou binární bitmapové obrázky – 2D pole (šířka, výška), kde každý element obsahuje buď 0/nepravda, nebo 1/pravda (viz Obr. 26). Výstupem je 24bitový RGB obrázek (viz Obr. 27) – multi-dimenzionální pole (šířka, výška, počet kanálů). RGB obrázek má 3 barevné kanály, kde každý barevný kanál může nabývat hodnot 0 až 255. Každému barevnému kanálu je vymezen jeden bajt – 8 bitů. Každý bit tohoto bajtu odpovídá binární hodnotě pixelu masky v dané diskretní pozici obrázku. Binární masku lze definovat v rámci 24bitového RGB obrázku jako bitovou rovinu – bitové roviny 0–7 jsou uloženy v kanálu R, bitové roviny 8–15 v kanálu G a bitové roviny 16–23 v kanálu B. Převedení bitů do bajtu je provedeno kombinací bitového součtu s bitovým posunem.



Obr. 26: Ukázka 3 binárních masek z celkového počtu 24⁵



Obr. 27: Výsledný 24bitový RGB obrázek

⁵ Ukázkové obrázky se nacházejí v C:\Texas Instruments-DLP\DLPC900REF-SW-5.1.0\DLPC900REF-SW-5.1.0\DLPC900REF-GUI\Images and Batch files\LCR9000_Images (součástí aplikace GUI)

5.2.2 Metody komprese 24bitového RGB obrázku

Paměťové možnosti modulu jsou odvozeny od kapacity vestavěné paměti DRAM řadiče a externí paměti flash nacházející se na desce. Externí paměť flash není rozšiřitelná, protože je daná návrhem desky – zvolené komponenty. Z tohoto důvodu se doporučuje (ale nevyžaduje) ukládat 24bitové RGB obrázky v zorném vektoru v komprimovaném formátu. Mezi možnostmi komprimace obrázků patří – nekomprimovat, kódování délky běhu RLE (Run Length Encoding) nebo rozšířené/vylepšené kódování délky běhu ERLE (Enhanced Run Length Encoding). Možnost nekomprimovat neprovádí komprimaci obrázků. Metody komprimace RLE a ERLE jsou bezztrátovými metodami komprese, které komprimují data 24bitových RGB obrázků na základě podobnosti pixelů. RLE je založena na horizontální podobnosti pixelů, zatímco ERLE na vertikálních a horizontálních podobnostech [10, 18].

Kódování délky běhu

Kódování délky běhu používá pevně definovanou strukturu kontrolních bajtů (viz Tab. 10). Tyto bajty slouží jako značky v komprimovaných datech obrázků. Pomocí těchto značek je firmware DLC900 schopen provést automatickou dekompresi obrázku při práci v režimech předem uloženého vzoru nebo v režimu vzoru za chodu [15].

Tab. 10: Kontrolní bajty pro kódování délky běhu [15]

Kontrolní bajt 1	Kontrolní bajt 2	Výsledek
0	0	Konec řádku
0	1	Konec obrázku (vyžadováno)
0	$n \geq 2$	Následuje n nekomprimovaných pixelů.
$n > 0$	n/a	Následující pixel je opakován n -krát.

Příklad v Tab. 11 popisuje dva řádky komprimovaného 24bitového RGB obrázku. V prvním sloupci se nacházejí komprimovaná data, zatímco ve druhém jejich dekomprimovaná podoba. Forma tabulky je pouze ilustrativní, ve skutečnosti jsou jednotlivá data v řádcích sloupce uložena v sekvenčně v paměti [15].

Tab. 11: Příklad kódování délky běhu (všechna data jsou v hexadecimálním tvaru) [15]

Komprimovaná data	Dekomprimovaná data
03 040506	040506 040506 040506
05 777777	777777 777777 777777 777777 777777
00 03 040506 070809 0A0B0C	040506 070809 0A0B0C
02 789ABC	789ABC 789ABC
00 00	Konec řádku
00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00 00 (konec řádku – výplň)
07 1D1E1F	1D1E1F 1D1E1F 1D1E1F 1D1E1F 1D1E1F 1D1E1F 1D1E1F

Komprimovaná data	Dekomprimovaná data
06 212223	212223 212223 212223 212223 212223 212223
00 01	Konec obrázku

Rozšířené kódování délky běhu

Rozšířené kódování délky běhu používá, stejně základní kódování délky běhu, pevně definovanou strukturu kontrolních bajtů (viz Tab. 12). Tyto bajty mají stejný účel. Hlavním specifikem této metody na rozdíl od základní je využívání podobnosti mezi řádky a kódování délky pomocí jednoho nebo dvou bajtů (viz Tab. 13). Příklad principu této metody komprese je popsán v Tab. 14 [15].

Tab. 12: Kontrolní bajty pro rozšířené kódování délky běhu [15]

Kontrolní bajt 1	Kontrolní bajt 2	Kontrolní bajt 3	Výsledek
0	0	n/a	Konec řádku
0	1	0	Konec obrázku
0	1	n	Kopírování n pixelů z předchozího řádku.
0	$n > 1$	n/a	Následuje n nekomprimovaných pixelů.
$n > 1$	n/a	n/a	Následující pixel je opakován n -krát.

Tab. 13: Pravidla pro kódování délky běhu [15]

Pravidlo	Výsledek
$n < 128$	bajt_0 = délka běhu
$n \geq 128$	bajt_0 = (délka běhu & 0x7F) 0x80 bajt_1 = (délka běhu >> 7)

Tab. 14: Příklad rozšířeného kódování délky běhu (hodnoty jsou v hexadecimálním tvaru) [15]

Komprimovaná data	Dekomprimovaná data
03 040506	040506 040506 040506
05 777777	777777 777777 777777 777777 777777
00 03 040506 070809 0A0B0C	040506 070809 0A0B0C
82 01 789ABC	789ABC 789ABC ... (513krát)
00 00	Konec řádku (+ konec řádku – výplň) jsou nepovinné pro ERLE
01 010203	010203
00 01 09	040506 040506 777777 777777 777777 777777 777777 040506 070809
00 01 00	Konec obrázku

5.2.3 Formát odesílaných obrazových dat

Obrazová data z podkapitoly 5.2.1 a 5.2.2 nemohou být odeslána do řadiče v klasickém formátu obrázku a bez hlavičky obrázku. Zároveň je nutné rozdělit obrázek z 2560x1600px na dva obrázky o velikosti 1280x1600px (každá půlka obrázku připadá jednomu řadiči). Komprimace se provádí na každém obrázku zvlášť – komprimovaná data pro primární řadič a komprimovaná data pro sekundární řadič. Výsledná datová struktura obrazových dat, ať už komprimovaných nebo nekomprimovaných, musí mít podobu 1D pole, protože při komunikaci přes USB jsou odesílaná data ve formě sekvence bajtů. Každé polovině obrázku, která je ve formě 1D pole, je na začátek přidána hlavička obrázku (viz Tab. 15) s parametry příslušné poloviny [15].

Tab. 15: Hlavička obrázku [15]

Počet bajtů	Popis
4	Podpis (0x53 0x70 0x6C 0x64)
2	Šířka obrázku (dva řadiče – polovina celkové šířky DMD)
2	Výška obrázku
4	Počet bajtů zakódovaných obrazových dat (dva řadiče – data odpovídající poloviny)
8	Rezervované ((0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF))
4	Barva pozadí (0xBB 0xGG 0xRR 0x00)
1	Rezervované (0x00)
1	Typ komprese (0 – nekomprimované, 1 – RLE, 2 – ERLE)
1	Rezervované (0x01)
21	Rezervované (0x00, ...)

6 PYTHON KNIHOVNA

Ačkoliv aplikace GUI, představená v kapitole 4 poskytuje kontrolu nad vyhodnocovacím modulem, tak je vlivem omezené kompatibility využitelná pouze v rámci operačního systému Windows. Zároveň se jedná o hotové řešení, které je zpracované ve formě GUI. Právě forma zpracování limituje možnosti její integrace do individuálně koncipovaných řešení, popř. do projektů zahrnující automatizaci nebo platformy vestavěných zařízení.

Dostupný ukázkový zdrojový kód je napsán v programovacím jazyce C/C++. Práce s tímto programovacím jazykem vyžaduje relativně rozsáhlé znalosti, zatímco programovací jazyk Python nabízí intuitivnější přístup a snazší syntaxi. Jedním z důvodů pro zvolení programovacího jazyka Python je relativně strmá učící křivka – od popularity Pythonu se odvíjí jeho detailní dokumentace a plno výukových materiálů. Použití Pythonu usnadní každému uživateli integraci vyhodnocovacího modulu do vlastních aplikací. Mezi další důvody patří např. rozsáhlá databáze knihoven, která poskytuje účinné nástroje pro zpracování dat, generování dat a jejich následné vyhodnocení, a to napříč mnoha obory.

6.1 Instalace knihovny

Python knihovna je vytvořena s využitím nástroje Poetry. Tento nástroj slouží ke správě závislostí a balíčkování v programovacím jazyce Python. Umožňuje deklarovat knihovny, na kterých projekt závisí, a spravuje je (instaluje/aktualizuje). Poetry nabízí uzamykací soubor pro zajištění opakovatelných instalací a dokáže sestavit projekt pro jeho následnou distribuci [19].

S využitím tohoto nástroje byl vytvořen balíček, který je dostupný v příloze A. Balíček se nachází ve složce `dlplcr9000evm`. V tomto balíčku je ukázkový soubor `example.py`, kde je znázorněna ukázka práce s tímto balíčkem. Instalace tohoto balíčku je možná např. pomocí nástroje `pip`. Instalace balíčku se provádí následujícím způsobem:

1. Provedení lokalizace složky balíčku, kde se nacházejí binární a konfigurační soubory, které obsahují mj. informace o všech závislostech. Příklad cesty lokalizované složky: `C:\Users\User\Downloads\dlplcr9000evm`
2. V příkazové řádce se s využitím příkazu `cd` provede přesunutí do složky balíčku.

```
Terminál
```

```
cd C:\Users\User\Downloads\dlplcr9000evm
```

3. Následuje použití příkazu `pip install` nástroje `pip` pro instalaci balíčku a všech jeho závislostí.

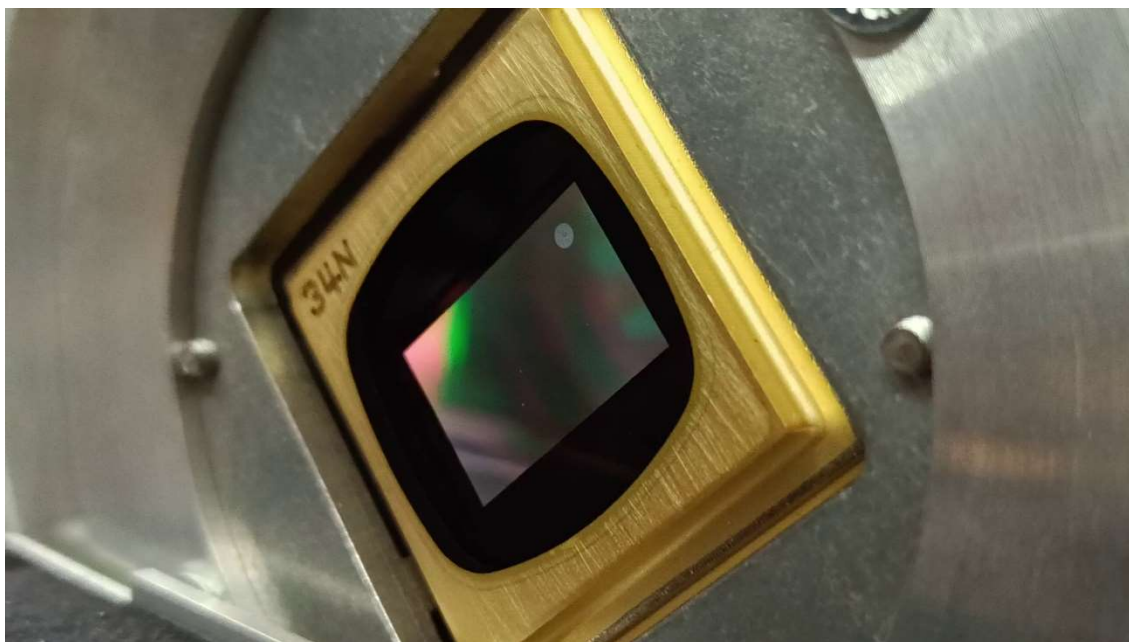
```
Terminál
```

```
C:\Users\User\Downloads\dlplcr9000evm> pip install .
```

4. Balíček lze nyní importovat do zdrojového kódu Python skriptu pomocí `import dlplcr9000evm`.

6.2 Vzorová aplikace vysokorychlostního zobrazení binárních masek

Vzorová aplikace ukazuje práci s knihovnou – importování knihovny, navázání komunikace s modulem, a provádění operací čtení a zápisu z modulu a do něj, a to za účelem zobrazení binárních masek na čipu DMD (viz Obr. 28). Zvolený režim zobrazování je režim vzoru za chodu.



Obr. 28: Binární maska zobrazená na čipu DMD

Pro ukázkou zobrazení binárních masek na čipu DMD byly zvoleny bitmapové obrázky z podkapitoly 5.2.1. Na Obr. 28 je zachycena binární maska, z celkové sady 400 binárních masek. Tyto binární masky jsou zobrazeny s dobou expozice 5000 mikrosekund. Tato doba expozice odpovídá rychlosti zobrazování 200 Hz. Ukázka zdrojového kódu, který byl použit k tomuto příkladu se nachází v příloze A (soubor `example.py`, který je součástí knihovny).

Celková dosažitelná rychlost zobrazování binárních masek, s využitím knihovny, je 9523 Hz (doba expozice 105 mikrosekund). Kvůli absenci kamerového zařízení, které by bylo schopno zachytit tuto rychlost, nebylo možné poskytnout obrázek, kde by byla tato rychlost zaznamenána. Ověření, že je tato rychlost dosažitelná, vychází z vizuální kontroly, jak mnou, tak i konzultantem z Ústavu fyzikálního inženýrství. Druhý způsob ověření využívá funkcionalitu knihovny, která kontroluje, zda byl daný příkaz a jeho parametry správně zadány. Po odeslání příkazu se požaduje od modulu odpověď, pokud je v bajtu příznaku, který je ve zprávě zpětné vazby, nastaven chybový bit na 1, tak se provádí operace čtení z modulu, a to pro získání chybového kódu a popisu chyby. To znamená, pokud by vysokorychlostní zobrazování binárních masek, při rychlosti 9523 Hz, nebylo možné, tak by se vyvolala výjimka s chybovým kódem 14 (doba expozice vzoru je mimo rozsah).

7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvoření knihovny v programovacím jazyce Python, která by umožnila řízení vyhodnocovacího modulu DLP LightCrafter 9000 EVM. Motivací bylo vytvoření přenositelného řešení, které by umožňovalo plně využít potenciál tohoto modulu. GUI aplikace, od výrobce Texas Instruments, je schopna demonstrovat funkcionality, které modul nabízí, a to i vysokorychlostní zobrazování binárních masek. Jedná se o desktopovou aplikaci, která je kompatibilní s operačním systémem Windows. Forma této aplikace a její kompatibilita jsou limitujícími faktory pro integraci tohoto modulu do individuálních řešení, např. automatizační procesy nebo vytvoření vestavěných řešení. Knihovna v programovacím jazyce Python poskytuje nejenom flexibilitu, ale i snadné propojení s celou řadou knihoven, které může uživatel využít např. k automatickému generování binárních masek.

První kapitola teoretické části práce se zabývá technologií DLP, na které je vyhodnocovací modul postaven. Jsou představeny principy, na základě kterých je tato technologie schopna provádět zobrazování obrazu. Nejen možnosti využití této technologie, ale i zobrazovací schopnosti, se odvíjejí od použitého hardwaru. V rámci této části jsou představeny dvě hlavní komponenty vyhodnocovacího modulu, a zobrazovací schopnosti, které se od této kombinace komponent odvíjejí.

Druhá kapitola teoretické části je zaměřena na příkazové řídicí rozhraní. Prostřednictvím příkazového řídicího rozhraní je umožněno ovládání vyhodnocovacího modulu. Mezi tato rozhraní patří USB a I²C. V rámci této části jsou představeny nejen principy a specifikace komunikace přes jednotlivá rozhraní, ale i názorné příklady, jak komunikace mezi modulem a hostitelským PC probíhá.

Poslední kapitola teoretické části popisuje aplikaci GUI od výrobce Texas Instruments. V rámci této části jsou popsána nastavení, která umožňují přizpůsobitelnost dostupných vlastností modulu. Zároveň je popsána práce s aplikací, a to za účelem zobrazení binárních masek pomocí režimu vzoru za chodu.

První kapitola praktické části je zaměřena především na analýzu příkazového řídicího rozhraní. S využitím aplikace GUI byly testovány funkcionality modulu. Každá akce v GUI je definována jako odesílání příkazu s příslušnými daty přes rozhraní USB. Prostřednictvím nástroje Wireshark byla tato komunikace zachycena. Kombinace zachycených dat, dostupné programátorské příručky a volně dostupných ukázkových zdrojových kódů z SDK, umožnila hlubší pochopení principu komunikace modulu s ohledem na daný příkaz. Tato kombinace také specifikovala postupy pro zpracování binárních masek do formátu, který je rozpoznatelný firmwarem, který se nachází v řadiči DLPC900. Zpracování obrazových dat obsahuje algoritmy pro sloučení binárních masek do 24bitového RGB obrázku nebo metody komprimace obrazových dat, které umožňují dosáhnout maximálního možného počtu uložených binárních masek v paměti řadiče, popř. modulu.

Poslední kapitola praktické části představuje motivaci pro vytvoření knihovny v programovacím jazyce Python. Definiuje postup instalace této knihovny, který zároveň zajistí, že budou automaticky nainstalovány závislosti, které jsou nutné pro práci s knihovnou. Součástí knihovny je i soubor, který popisuje práci s ní. Obsah tohoto souboru je zároveň vzorovou aplikací vysokorychlostního zobrazení binárních masek, kterého bylo dosaženo. Výstupem vzorové aplikace je zobrazení binárních masek, které překonává dosavadní rychlost zobrazování 60 Hz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DLP products | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/dlp-chip/overview.html>
- [2] DLP and 3LCD Projectors: What Each Type Means for Color Performance | BenQ India. In: *LCD Monitors, Projectors, Speakers and Lighting | BenQ India* [online]. Gurgaon: BenQ, 2021 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.benq.com/en-in/business/resource/trends/dlp-and-3lcd-projectors.html>
- [3] How To Display Video & Control Light Using TI DLP® Technology. In: *YouTube* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2019 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=IK-4DVQUCTw>
- [4] DLP™ System Optics. In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2010 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf>
- [5] Introduction to ±12 Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs). In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2018 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/dlpa008b/dlpa008b.pdf>
- [6] DLPC900 Digital Controller for Advanced Light Control. In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlpc900.pdf>
- [7] DLPC900 data sheet, product information and support | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/DLPC900>
- [8] DLP9000 Family of 0.9 WQXGA Type A DMDs. In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp9000.pdf>
- [9] DLP9000 data sheet, product information and support | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/DLP9000>
- [10] DLP® LightCrafter™ Dual DLPC900 Evaluation Module (EVM) User's Guide. In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/dlpu102b/dlpu102b.pdf>

- [11] DLPLCR9000EVM | Buy TI Parts | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/DLPLCR9000EVM/part-details/DLPLCR9000EVM>
- [12] DLPLCR9000EVM. In: *DigiKey Electronics Czech Republic – Electronic Components Distributor* [online]. Thief River Falls: Digi-Key Electronics, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/products/detail/texas-instruments/DLPLCR9000EVM/5066952>
- [13] DLPLCR90EVM Evaluation board | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/DLPLCR90EVM>
- [14] DLPLCRC900DEV Evaluation board | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/DLPLCRC900DEV>
- [15] DLPC900 Programmer's Guide. In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/dlpu018h/dlpu018h.pdf>
- [16] I2C-bus specification and user manual. In: *NXP® Semiconductors Official Site | NXP Semiconductors* [online]. Eindhoven: NXP Semiconductors, c2021 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [17] DLPC900REF-SW Firmware | TI.com. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/DLPC900REF-SW>
- [18] DLP® LightCrafter™ 6500 and 9000 Evaluation Module (EVM) User's Guide. In: *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/dlpu028d/dlpu028d.pdf>
- [19] Poetry. *Poetry – Python dependency management and packaging made easy* [online]. c2018-2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://python-poetry.org/>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A. CD-ROM

PŘÍLOHA A. CD-ROM

Tab. 16: Obsah CD – hlavní adresář („\Diplomová práce\“)

Adresář	Soubor
\DP_PDF\	2023_DP_FILIP_Jakub_200532_VUT_FSI_UAI.pdf
\Knihovna\	dlplcr9000evm.zip
\Wireshark\	dlplcr9000evm_zaznam_komunikace.zip