

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

## Návrh nové generace komunikačního modulu pro automobily

Marek Janský

Vedoucí: Ing. Vít Záhlava, Csc.  
Obor: Elektronika a komunikace  
Květen 2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janský** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **466331**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh nové generace komunikačního modulu pro automobily**

Název bakalářské práce anglicky:

**New Generation Automotive Communication Module Design**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku multimediálních komunikačních modulů.
2. Vyberte vhodný bezdrátový modul.
3. Navrhněte obvodové elektrické schéma zapojení komunikačního modulu s LTE a GNSS.
4. Navrhněte desku plošného spoje.
5. Ověřte funkčnost systému.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

1. Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005
2. Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
3. Rumney, M.: LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, Wiley Telecom 2013
4. Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástek

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Záhlava, CSc., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

\_\_\_\_\_  
Ing. Vít Záhlava, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Vítu Záhlavovi, Csc. za přínosné konzultace. Dále bych chtěl poděkovat společnosti IMA s.r.o. za příležitost vytvořit tuto práci v rámci projektu. Děkuji také své rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 20. května 2020

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh nové generace komunikačního modulu pro multimediální automotive jednotku. V práci je popsán projekt BBCU, jeho součásti, technologie LTE a její současný stav v ČR. Dále je v ní také popsán postup výběru vhodného komunikačního modulu pro požadavky projektu. Součástí práce je návrh konkrétního elektronického řešení modulu.

**Klíčová slova:** LTE, GNSS, bezdrátový modul, komunikace, multimediální jednotka, BroadR-Reach, automobil

**Vedoucí:** Ing. Vít Záhlava, Csc.

## Abstract

This bachelor thesis is focused on design of a new generation communication module for automotive multimedia unit. It describes the project called BBCU, its components, LTE technology and its current situation in Czech Republic. Moreover, it defines requirements for such a module and based on them conducts research on available communication modules. At last the development of the LTE module and its testbed is explained.

**Keywords:** LTE, GNSS, wireless module, communication, multimedia device, BroadR-Reach, car

**Title translation:** New Generation Automotive Communication Module Design

## Obsah

<b>1 Úvod a motivace</b>	<b>1</b>	3.1.1 Návrh elektrického schématu	19
<b>2 Teoretická část</b>	<b>3</b>	3.1.2 Tvorba vlastních knihoven součástek	19
2.1 Popis projektu BBCU	3	3.1.3 Návrh DPS	20
2.1.1 BBCU MB	3	3.1.4 Požadavky na výrobu DPS	22
2.1.2 Modul BBCU PB	4	3.1.5 Princip výroby DPS	22
2.1.3 Modul BBCU LTE	5	3.2 Návrh modulu BBCU LTE	22
2.1.4 BBCU LTE testbed	5	3.2.1 LTE TOBY-L406-51	23
2.2 LTE	5	3.2.2 GNSS NEO-M8Q	23
2.2.1 Využívané technologie	6	3.2.3 USB	24
2.2.2 LTE v České republice	7	3.2.4 Napájení	24
2.2.3 LTE Advanced	7	3.2.5 Připojení vysokofrekvenčních signálů	25
2.3 Požadavky na komunikační modul BBCU LTE	7	3.2.6 UART	26
2.3.1 Funkce modulu	7	3.2.7 Návrh PCB	26
2.3.2 Rozhraní modulu	8	3.3 BBCU LTE testbed	27
2.3.3 Formát modulu	8	3.3.1 Elektrické schéma	27
2.4 Výběr bezdrátového LTE modulu	9	3.3.2 Návrh DPS	28
2.4.1 Volba GNSS modulu	10	3.4 BBCU PB 2.0	29
2.5 Komunikační sběrnice	10	3.4.1 Úprava vedení pro BroadR-Reach	30
2.5.1 I <sup>2</sup> C	10	3.4.2 Přizpůsobení desky pro bezdrátový modul	31
2.5.2 UART	12	<b>4 Závěr</b>	<b>33</b>
2.5.3 USB	12	<b>A Bibliografie</b>	<b>35</b>
2.6 Impedance vedení	14	<b>B Schéma zapojení BBCU LTE</b>	<b>39</b>
2.7 Návrh v software EAGLE	16	<b>C Schéma zapojení BBCU LTE testbed</b>	<b>45</b>
<b>3 Praktická část</b>	<b>19</b>		
3.1 Principy návrhu DPS	19		

## Obrázky

2.1	Blokové schéma projektu BBCU .	3	3.10	Připojení BBCU LTE v rámci BBCU LTE testbed .....	28
2.2	Deska BBCU PB 1.0 .....	4	3.11	Konektor SMA pro horizontální SMD montáž .....	29
2.3	Znázornění 2x2 MIMO .....	6	3.12	DPS desky BBCU LTE testbed	30
2.4	Modul Cinterion AH3-W [8] .....	8	3.13	Tranzistory pro ovládání power a reset signálů .....	31
2.5	Znázornění zapojení zařízení na sběrnici I <sup>2</sup> C .....	11			
2.6	Časový diagram průběhu I <sup>2</sup> C komunikace [13] .....	11			
2.7	Časový diagram datového rámce UART .....	12			
2.8	Struktura USB hubu .....	13			
2.9	Vybrané druhy VF vedení .....	14			
2.10	Prostředí software EAGLE - návrh desky BBCU LTE .....	17			
3.1	Rozmístění plošek a tvar modulu NEO-M8Q [20] .....	20			
3.2	Rozmístění plošek a tvar modulu TOBY-L4 .....	20			
3.3	Software Saturn PCB Toolkit ..	21			
3.4	Blokové schéma modulu BBCU LTE .....	23			
3.5	Vzájemné propojení GNSS a LTE modulu [19] .....	24			
3.6	Zapojení detekčního obvodu LTE antén .....	25			
3.7	Zapojení napájecího obvodu pro aktivní GNSS anténu .....	26			
3.8	Vrstvy DPS modulu BBCU LTE	27			
3.9	Konektor Molex 52991-0808 ....	28			



## Tabulky

2.1 Přiřazení frekvenčních pásem LTE používaných v ČR .....	7
2.2 Srovnání vybraných modulů .....	9

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
LTE	Long Term Evolution - vysokorychlostní technologie mobilních sítí
SoM	System on Module
ISO	International Organization for Standardization
USB	Universal Serial Bus
ECAD	Electronic Computer-Aided Design
DPS	Deska Plošných spojů
GNSS	Global Navigation Satellite System
MCU	Micro Controller Unit
TVS	Transient Voltage Suppression
CAN	Controller Area Network
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
ADC	Analog to Digital Converter
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
ESD	Electrostatic discharge
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
AT	Attention command
EMI	Electro-Magnetic Interference
ESD	Electric Static Discharge
VF	Vysoká Frekvence
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
SD	Secure Digital
DDR	Double-Data-Rate
NAND	Logická funkce negativního součinu
SATA	Serial ATA (Advanced Technology Attachment)
DSI	Display Serial Interface
CSI	Camera Serial Interface
LVDS	Low Voltage Digital Signalling
MIPI	Mobile Industry Processor Interface
PCM	Pulse Coded Modulation
SIM	Subscriber Identity Module
GPS	Global Positioning System
FET	Field Effect Transistor
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAM	Pulsně Amplitudová Modulace
LNA	Low Noise Amplifier
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution



# Kapitola 1

## Úvod a motivace

Tato práce se zabývá návrhem nové generace komunikačního modulu pro multimediální automotive elektronickou jednotku. Současná verze této jednotky stále využívá zastaralou technologii 3G UMTS a GPS. Ta je dnes v České republice převážně nahrazena mobilními sítěmi LTE, LTE Advanced a službou GNSS.

Cílem práce je navrhnout vhodný bezdrátový modul, který bude podporovat moderní síť LTE (případně LTE Advanced) a umožňovat kombinovaný příjem služeb GNSS. Úkolem komunikačního modulu bude zprostředkovat přístup k multimediálnímu a telemetrickému obsahu pro automotive jednotku. Ta bude dále obsah distribuovat především pomocí sběrnice BroadR-Reach. Součástí práce je návrh prostředku pro vývoj a testování modulu a také aktualizace periferní desky projektu na novou verzi.

V první části se práce věnuje popisu celého projektu a jeho prvků. Následně bude stručně představena technologie LTE a její stav v Česku. Na základě těchto informací pak budou stanoveny požadavky pro výběr LTE modulu a podle nich se zvolí vhodné řešení. Budou také vysvětleny základní principy použitých sběrnic a problematika impedance vedení na deskách plošných spojů.

V druhé části bude nejprve zběžně popsán princip návrhu a výroby DPS a poté budou uvedena konkrétní řešení návrhu pro všechny desky. Budou vysvětlena zásadní rozhodnutí při návrhu, připojení komunikačních sběrnic a při vytváření rozložení a zapojení na desce.

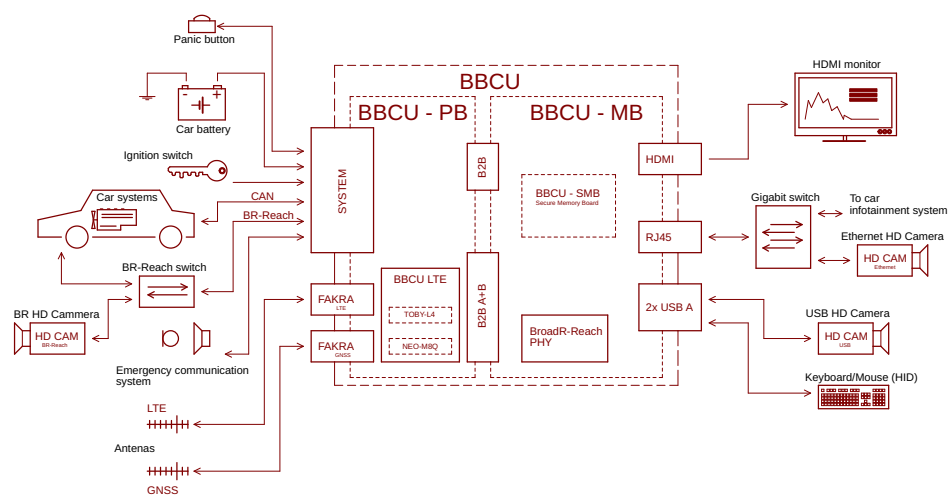


## Kapitola 2

### Teoretická část

#### 2.1 Popis projektu BBCU

Projekt BBCU sestává ze 2 hlavních částí: BBCU MB (Main Board) a BBCU PB (Peripheral Board). Na desce PB je pak umístěn komunikační modul.



Obrázek 2.1: Blokové schéma projektu BBCU

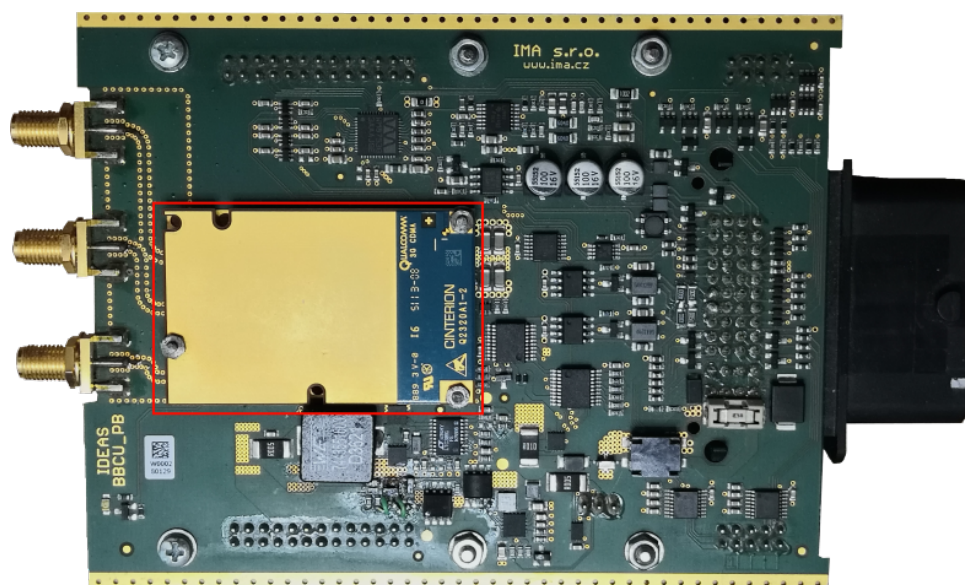
##### 2.1.1 BBCU MB

BBCU MB (Main Board) je hlavní výpočetní uzel projektu. Obsahuje dvoujádrový NXP i.MX6 procesor architektury ARM A9. Je konfigurován s 2 GB DDR3 operační paměti, 32 GB NAND flash paměti a rozhraním SATA. Dále deska obsahuje USB 2.0 hub, 100BASE-TX Ethernet, 100BASE-T1 BroadR-

Reach [1] Ethernet pro automotive aplikace, HDMI, DSI<sup>1</sup> a CSI<sup>2</sup>, slot pro  $\mu$ SD karty. Na této desce jsou obsaženy také veškeré napájecí zdroje pro procesor a ostatní periferie. Na obrázku 2.1 lze vidět blokové schéma celého projektu. Integrované spínané zdroje a lineární stabilizátory na BBCU MB pracují se vstupním napětím v rozsahu 3,6 – 5,5 V, které odpovídá napětí připojenému z BBCU PB. Napájecí větve 3,3 a 5 V jsou pak pomocí konektorů připojeny zpět na BBCU PB.

### 2.1.2 Modul BBCU PB

Periferní deska BBCU obsluhuje připojení esenciálních sběrnic a signálů pro komunikaci s automobilem na standardizovaný systémový konektor. Zároveň obsahuje hlavní napájecí zdroj, který upravuje napájecí napětí automobilu z 12 V na 5,5 V. Toto napětí se dále dělí na vstup pro nabíjecí obvod li-ion článku a jako jeden ze vstupů do obvodu pro zajištění provozu bez přerušení napájení. Takový obvod sestává z operačního zesilovače v režimu komparátoru napětí a spínacích MOSFET tranzistorů. Funkcí tohoto obvodu je přepnout výstupní napájení BBCU MB na li-ion článek v případě přerušení přívodu hlavního napětí.



Obrázek 2.2: Deska BBCU PB 1.0

Součástí BBCU PB je komunikační a lokalizační modul, který je zvýrazněný na obrázku 2.2. V původní verzi bylo použito integrované řešení 3G UTMS a GPS. Pro vývoj nové generace BBCU bylo na základě požadavků projektu nutné využít technologie - LTE a GNSS.

<sup>1</sup>Definice diferenciálního rozhraní pro sériové připojení zobrazovacích zařízení

<sup>2</sup>Definice sériového rozhraní pro připojení obrazových senzorů

### ■ 2.1.3 Modul BBCU LTE

BBCU LTE je hlavním objektem této práce. Aby se zachovala kompatibilita a možnost využití platformy do budoucna, byl zvolen vývoj formou odnímatelného modulu. Takový modul bude integrovat přijímač GNSS a bezdrátový LTE modul. Ten by se měl připojit k BBCU PB pomocí B2B<sup>1</sup> modulového konektoru a pomocí odhalený plošek DPS.

### ■ 2.1.4 BBCU LTE testbed

Součástí vývoje modulu BBCU LTE je vytvoření desky pro jeho testování. Takové zařízení by mělo obsahovat všechny náležitosti pro zprovoznění a následné ověření správné funkcionality modulu.

Požadavky na funkcionalitu LTE testbed:

- USB konektor pro datové připojení k modulu
- Konektor pro připojení napájení
- Potřebné napájecí zdroje
- Konektor pro SIM kartu
- SMA konektory pro VF antény
- Tlačítka pro reset a zapnutí

## ■ 2.2 LTE

LTE je technologie přenosu vysokorychlostních dat v mobilních buňkových sítích vyvíjena organizací 3GPP. Je založena na třetí generaci mobilních systémů UMTS. První komerční aplikace byly spuštěny v roce 2009 ve Švédsku [2].

---

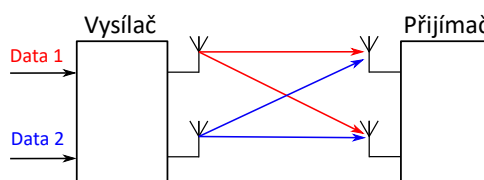
<sup>1</sup>B2B - Board to Board

### 2.2.1 Využívané technologie

Při vytváření specifikací telekomunikační technologie LTE byly určeny tyto požadavky: [3]

- Rychlost 100 Mbps down-link, 50 Mbps 50 Mbps up-link
- Obsloužení až 200 aktivních klientů v rámci buňky
- Méně než 5 ms zpoždění
- Spolehlivost při pohybu klienta
- Podpora QoS<sup>1</sup>
- Flexibilita využití šířky pásma (1,25 – 20 MHz)

Pro splnění vysokých nároků využívá LTE OFDM modulaci, která rozděluje informace do více paralelních kanálů s ortogonálně rozmístěnými nosnými frekvencemi. Každá z nich je kódována separátně. Přenos má díky tomu teoreticky stejnou propustnost jako jeden kanál o stejné šířce pásma, jakou zabírají všechny OFDM frekvence dohromady. Tento způsob modulace je odolnější vůči frekvenčnímu rušení, ale je citlivější na změnu frekvence vlivem Dopplerova efektu a v časové oblasti má signál velké výkyvy amplitudy a klade vyšší nároky na výkonovou strukturu. [4]



Obrázek 2.3: Znárodnění 2x2 MIMO

Další důležitou technologií pro LTE je MIMO<sup>2</sup>. Ta je založena na principu prostorového rozložení vysílání - fyzicky je třeba více antén na straně přijímače i vysílače - avšak přenos stále probíhá na stejné frekvenci a ve stejný čas. Liší se tedy pouze referencí mezi sebou. Například 2x2 MIMO využívá dvě antény na straně přijímače i vysílače (viz obrázek 2.3).

FDD (Frequency Division Duplex) je technika používaná v telekomunikacích pro obousměrný přenos. Vysílač i přijímač pracují na odlišné nosné frekvenci se specifickým offsetem. Na rozdíl od TDD (Time Division Duplex) má nižší zpoždění a nemá vysoké nároky na složitost obvodů.

<sup>1</sup>Quality of Service

<sup>2</sup>MIMO - Více vysílačů a přijímačů



## 2.2.2 LTE v České republice

Aktuálně v ČR provozují sítě s technologií LTE 3 operátoři a její komerční spuštění proběhlo v roce 2012. Z počátku zavádění byla využívána pásma 900 a 1800 MHz. Následně se roce 2013 a 2016 pásma rozšířila o oblast 800, 2100 a 2600 MHz. K 1. 1. 2017 bylo v pásmu 800 MHz pokryto 95 % obyvatel ČR. Z důvodů příznivějšího šíření nižších frekvencí v prostoru umožňuje pásmo 800 MHz pokrytí většího území stejným počtem vysílačů než ve vyšších pásmech. Aktuálně se v ČR využívají hlavně pásma B20, B3 a v menší míře B1 a B7. Všechna pásma využívají FDD. [2]

**Tabulka 2.1:** Přiřazení frekvenčních pásem LTE používaných v ČR

LTE pásmo	Střední frekvence pásma [MHz]
B1	2100
B3	1800
B7	2600
B8	900
B20	800

## 2.2.3 LTE Advanced

Aktualizace specifikace LTE na síť čtvrté generace, která je zpětně kompatibilní s předchozími verzemi. Umožňuje větší šířku pásma a efektivnější využití přiřazených frekvencí, což v důsledku znamená vyšší maximální propustnost. Kromě jiných vlastností podporuje vícenásobné MIMO a optimalizuje konektivitu v zahlcené síti sdílením pásma mezi koncová zařízení (na úkor maximální přenosové rychlosti). Toho je schopna agregací více kanálů a dynamickou změnou využití šířky pásma.[5] a [6]

## 2.3 Požadavky na komunikační modul BBCU LTE

Před návrhem modulu byly stanoveny požadavky, které by na konci vývoje měl splnit.

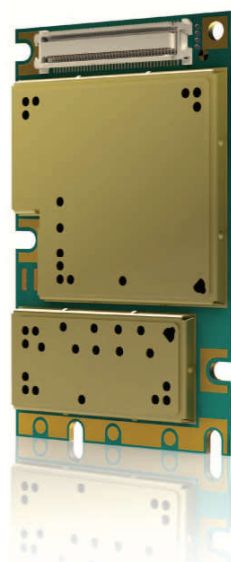
### 2.3.1 Funkce modulu

Základní funkcí komunikačního modulu je zajištění připojení k LTE mobilní síti pro přístup k multimediálnímu obsahu. Prostřednictvím sběrnice USB bude možné vytvořit virtuální síťové rozhraní pro přenos dat a pomocí virtuálního sériového portu a AT příkazů bude možné ovládání či konfigurace

modulu. Modul by měl dále obsahovat přijímač GNSS, což je služba, která pomocí družic zajišťuje geografickou lokalizaci s pokrytím celého světa. Signály z těchto družic zachycují přijímače, které na jejich základě spočítají souřadnice. Služba pod sebe zahrnuje poziční systémy jako například GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou-3. [7]

### 2.3.2 Rozhraní modulu

Rozhraní bezdrátového komunikačního modulu bude rozděleno na 2 části: vysokofrekvenční část a komunikační část. Vysokofrekvenční část bude tvořena odhalenými ploškami mědi na modulu, které vytvoří kontakt s pružinovými konektory jež budou umístěné na nadřazené desce. Komunikační část bude sloužit k přenosu napájení, datových signálů pro SIM, USB, PCM a UART.



Obrázek 2.4: Modul Cinterion AH3-W [8]

### 2.3.3 Formát modulu

Formát modulu by měl vycházet z minulé generace komerčního produktu. Na obrázku 2.4 lze vidět předchozí modul, který je řešený na standardní DPS. Ta obsahuje 80 kontaktní modulový konektor, odhalené plošky pro přenos VF signálů a funkční bloky součástek chráněné plechovým stíněním. Tento formát byl zvolen z důvodu co nejjednodušší implementace. Pokud bude zachován takový formát, zásahy do BBCU PB budou minimální.

## 2.4 Výběr bezdrátového LTE modulu

Výběr vhodného komunikačního modulu byl zásadním krokem práce. Zvolený modul musí splňovat následující požadavky, které vychází z funkcionality předchozí generace jednotky. Požadavky na modul jsou tyto:

- Existence varianty modulu pro použití v automobilovém průmyslu
- Podpora EMEA<sup>1</sup> frekvenčních pásem
- USB komunikační rozhraní alespoň verze 2.0
- Přijímač GNSS

V době provádění průzkumu trhu bylo jako vstupní vzorek k dispozici 164 různých řešení od 17 výrobců. Žádný z modulů nebyl kompatibilní s konektory a formátem původní verze, což implikovalo nutnost zásadní adaptace BBCU PB, či vytvoření vlastního modulu.

Přidáno bylo několik kritérií, podle kterých se výběr modulů redukoval - nutná podpora pásem FDD-LTE B1/B3/B7/B20, fallback na síť 2G v případě ztráty signálu, dostupnost modulu pro prototypový vývoj a v případě konstrukce jako kompletního modulu nutnost integrovat technologie GNSS.

V tabulce 2.2 je srovnán úzký výběr LTE modulů.

**Tabulka 2.2:** Srovnání vybraných modulů

Výrobce	Quectel	Gemalto	Sierra Wireless	u-blox
Název modulu	AG35-E	ELS81-E	AR7594	TOBY-L4106
Podporované FDD-LTE pásma	B1/B3/B5/B7/B8/B20/B28	B1/B3/B7/B8/B20/B28A/B32	B1/B3/B7/B8/B20/B28A/B32	B1/B3/B7/B8/B20
LTE kategorie	Cat-4 150 Mbit/s	Cat-4 150 Mbit/s	Cat-6 300 Mbit/s	Cat-6 300 Mbit/s
Podpora 2G GPRS/EDGE	ANO	ANO	ANO	ANO
Podpora 3G UMTS	ANO	ANO	ANO	ANO
Integrace GNSS	GPS/GLONASS BeiDou/Galileo QZSS <sup>2</sup>	NE	GPS/Glonass Galileo/BeiDou	NE
Rozhraní	USB 2.0	USB 2.0	USB 3.0	USB 3.0
Rychlost rozhraní	480 Mbit/s	480 Mbit/s	5 Gbit/s	5 Gbit/s
Ovládání modulu	AT	AT	Linux API/AT	AT
Automotive varianta	IATF 16949	ANO	ANO	ISO 16750
Teplotní rozsah	-40 – 85 °C	-40 – 85 °C	-40 – 85 °C	-40 – 85 °C

Zdroje dat tabulky: [9], [10], [11], [12].

<sup>1</sup>EMEA - Geografická oblast Evropy a Asie

Moduly AG35-E a ELS81-E nebyly v závěru vybrány, protože pracují pouze s LTE kategorie 4. Modul AR7594 podporuje open source platformu a umožňuje tak konfiguraci operačního systému podle potřeb vývoje. Není však dostupný pro prototypovou výrobu do projektové aplikace.

Výsledná volba padla na modul TOBY-L4 od výrobce u-blox. Absence integrovaného přijímače GNSS je kompenzována použitím separátního modulu. Protože stále probíhá intenzivní vývoj na poli komunikačních i lokalizačních modulů, je tímto krokem zajištěna jeho nezávislost v případě výměny za novější generaci. TOBY L4 byl vybrán zejména kvůli dobrým zkušenostem se společností u-blox a jejím distributorem pro ČR, jeho dostupností, kvalitní dokumentací a jednoduchostí implementace. Pro komunikaci s modulem bude využito rozhraní USB 2.0, UART a I<sup>2</sup>C.

### ■ 2.4.1 Volba GNSS modulu

Protože vybraný modul nepodporuje příjem GNSS, bylo nutné zvolit dodatečný přijímač. NEO-M8Q je doporučeným doplňkem modulu TOBY-L4. Umožňuje současný příjem až tří lokalizačních satelitních služeb a přímou komunikaci s modulem pomocí proprietární sběrnice DDC<sup>1</sup> založené na I<sup>2</sup>C. Materiály výrobce předpokládají, že modul TOBY-L4 bude podporovat přímou komunikaci s tímto GNSS. To by posléze ulehčilo celkovou náročnost implementace komunikace a více integrovalo řešení.

## ■ 2.5 Komunikační sběrnice

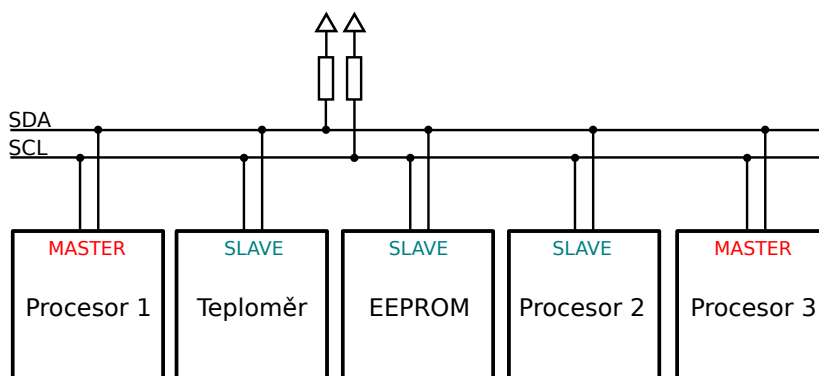
Pro propojení komponent je využito několika druhů komunikačních sběrnic. Tato kapitola se jimi bude stručně zabývat.

### ■ 2.5.1 I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C neboli Inter-Integrated Circuit je jednoduchou a běžně používanou sběrnicí vyvinutý společností Philips. Uplatnění najde především pro připojení periférií v rámci jednoho zařízení. Zřídka kdy se používá pro připojení periférií mimo jednu sestavu zejména proto, že nedefinuje žádnou fyzickou ochranu proti rušení prostředí. Sběrnice sestává pouze ze dvojice signálů - SDA (sériová data) a SCL (sériové hodiny). Oba mají v klidovém stavu úroveň logické 1. Na sběrnici se paralelně připojí všichni účastníci komunikace. Vzhledem k jejímu multi-master charakteru na ní může existovat více než 1 řídicí uzel typu master (znázorněno na obrázku 2.5).

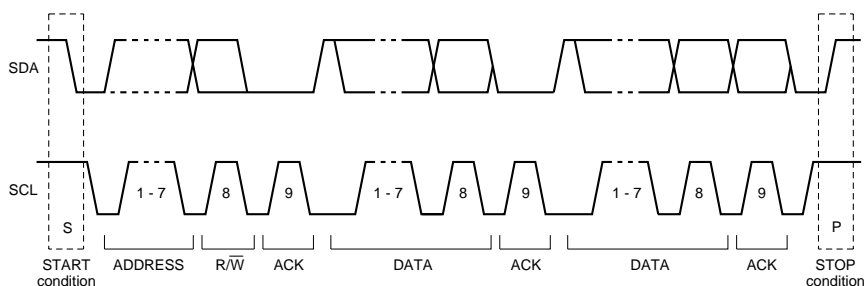
---

<sup>1</sup>Display Data Channel



Obrázek 2.5: Znázornění zapojení zařízení na sběrnici I<sup>2</sup>C

Existují základní 2 druhy přenosu dat - případ, kdy master požaduje data od slave a případ, kdy master posílá data do slave. Rychlosti jsou možné od 100 kbps do 3,4 Mbps, a to podle podpory jednotlivých uzlů. Data jsou vysílána jako MSB<sup>1</sup>. Pro jeho univerzálnost se využívá i jako platforma standardizovaných nastaveb, například SMBus (System Management Bus) a PMBus (Power Management Bus).



Obrázek 2.6: Časový diagram průběhu I<sup>2</sup>C komunikace [13]

Transakce probíhá tak, že master začne vysláním START příznaku a generováním hodinového signálu (podle obrázku 2.6). Po něm následuje 7 bitů adresy zařízení, na které přenos cílí. Pak master vyšle bit  $R/\overline{W}$ , kterým identifikuje typ transakce. Master poté čeká na ACK (Acknowledge) příznak, kterým slave potvrdí, že je na adrese aktivní a připraven na příjem. Pokud jde o transakci typu R (Read), master generuje dále hodinový signál a na SDA detekuje vyslaná data. Po zaznamenání celého bloku potvrdí jeho příjem zasláním ACK příznaku. Pokud jde o transakci typu  $\overline{W}$  (Write), master po odeslání adresy posílá data a po každém bloku očekává příjem příznaku ACK. Počet vyslaných bloků není omezen, ale data jednoho bloku musí být vždy o délce osmi bitů a zakončena příznakem ACK. Celá transakce se ukončí STOP příznakem, který zasílá vysílající uzel. [13]

<sup>1</sup>MSB - Most Significant Bit first

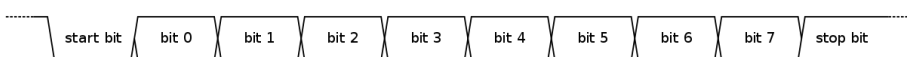
## 2.5.2 UART

UART - Universální asynchronní přijímač-vysílač. Sběrnice sloužící k jednoduchému přenosu dat mezi dvěma body. Historicky se používal pro připojení textových terminálů nebo k připojení modemů. Konkrétně jde o specifikaci samotného zařízení (rozhraní) pro vysílání a příjem datových signálů. To může být buď synchronní nebo asynchronní. [14]

V synchronním režimu není sběrnice synchronní pro každý bit (nemá bitový hodinový signál), ale používá příznakové signály pro řízení datového toku přijímače a vysílače pro celé rámce bitů. Jde například o signály RTS (Request To Send), CTS (Clear To Send) a DSR (Data Set Ready).

V asynchronním režimu se používají pouze 2 signály - TX (vysílač) a RX (přijímač). Veškeré další nezbytné parametry přenosu musí být nastaveny v komunikujícím zařízení. Zásadními parametry jsou:

- Délka rámce - udává počet bitů slova a počet stop bitů. Značí se například 8N1 - 8 bitů dat, 1 stop bit
- Rychlost přenosu - určuje počet změn stavu signálu za jednotku času, jednotkou je Baud. Například 9600 baud.
- Parita - může být lichá, sudá nebo žádná.

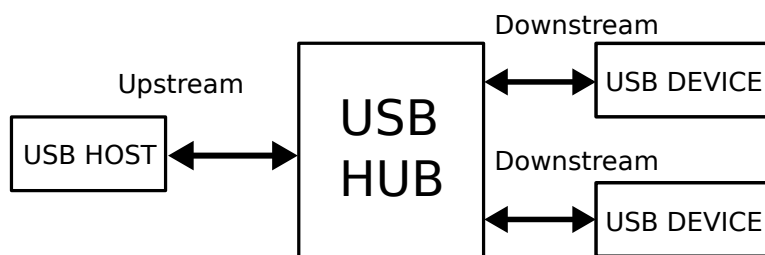


**Obrázek 2.7:** Časový diagram datového rámce UART

Na obrázku 2.7 lze vidět časový diagram rámce. Klidový stav je v logické 1. Přenos začne nastavením logické 0 na signálu. Přijímač detekuje sestupnou hranu a začíná vzorkovat. Po startovním bitu, který je vždy logická 0, následují samotná data v délce standardně od 5 do 8 bitů. Za nimi pokračuje volitelný bit parity a stop bit, který je vždy logická 1. Díky tomu je v přenosu vždy alespoň jeden přechod mezi úrovněmi a přijímač tak pozná, že jde o validní rámec.

## 2.5.3 USB

USB je specifikace sériového komunikačního protokolu. Vznikl za spolupráce několika společností v roce 1995 za účelem nahradit dříve používané sběrnice (RS-232, paralelní port, PS/2 apod.) pro běžné periferie - tiskárny, paměti, modemy a ovládací zařízení. [14]. Oproti starším sběrnicím podporovala připojení plug and play, které umožňuje zapojení a vypojení zařízení bez



**Obrázek 2.8:** Struktura USB hubu

nutnosti restartování. USB však zdědilo princip point-to-point komunikace, kdy je na jednom úseku jen jeden master a jeden slave. Komunikaci zahajuje vždy master.

Pro možnost připojení více zařízení k jednomu USB portu se využívají USB Huby. Ta agregují více zařízení (downstream) do jednoho masteru (upstream). USB hub je aktivní prvek a řídí přístup k médiu, tudíž všechna zařízení připojená jako downstream k hubu sdílí šířku pásma jednoho upstream toku (zvýrazněno na obrázku 2.8). Sběrnice umožňuje hloubku struktury až na 7 vrstev (včetně vrstvy hlavního radiče?). To v praxi znamená, že mezi zařízením a hostem může být až 5 hubů.

Fyzický přenos probíhá jako half-duplex po jednom diferenciálním páru vodičů. Důležitou vlastností USB je jeho schopnost napájet připojené zařízení. Toho je využito například u přenosných pamětí, multimediálních periferií, klávesnic a myši, ale i pro nabíjení bateriových zařízení. USB také zajišťuje ochranu proti přetížení - pokud zařízení začne odebírat z napájení sběrnice více výkonu než je definováno, napájení je vypnuto.

Široce používané verze specifikace USB jsou:

- USB 1.1 - Modernizovaná varianta verze USB 1.0 - umožňuje rychlosti až 12 Mbit/s
- USB 2.0 - třídy zařízení low speed, full speed, high speed až 480 Mbit/s
- USB 3.1 - Přejmenováno z původní verze 3.0, je plně duplexní (další 2 diferenciální páry), rychlost až 10 Gbit/s
- USB 3.2 - Aktuálně nejrychlejší dostupná verze, rychlost až 20 Gbit/s

Tabulka vychází z údajů dostupných z [15].

## 2.6 Impedance vedení

Při vysokých kmitočtech (zhruba nad 100 MHz) se na vodičích začínají projevat parazitní kapacity a indukčnosti. Proto je třeba zohledňovat výslednou frekvenčně závislou impedanci  $Z$  než odpor vodiče.

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.1)$$

Impedance na vysokých frekvencích začne být významnější než reálný odpor vodiče. Pro případ, kdy je odpor vodiče zanedbatelný (což předpokládáme), se vztah 2.1 zjednoduší na výraz

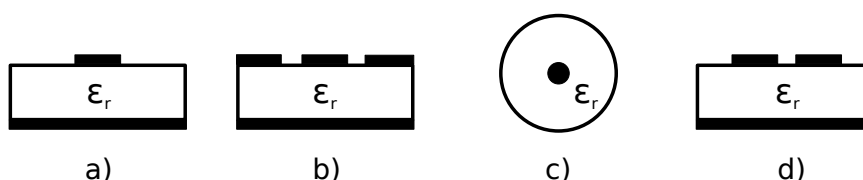
$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (2.2)$$

kde  $C_0$  je charakteristická kapacita vedení (často vyjádřena na jednotku délky) a  $L_0$  je charakteristická indukčnost (také vztahena na jednotku délky)

Každý element vedení (konektor, výstup, vodič) má svou charakteristickou impedanci a pro úplný přenos výkonu bez útlumů a odrazů je nutné dodržet rovnováhu

$$Z_{\text{Vysílač}} = Z_{\text{Vedení}} = Z_{\text{Přijímač}}. \quad (2.3)$$

Proces optimalizace vedení  $Z_{\text{Vysílač}}$  a  $Z_{\text{Přijímač}}$  se nazývá přizpůsobení impedance. Pomocí ideálně bezztrátových elektronických komponent se vyvažuje komplexní impedance (rovnice 2.1) na určitou reálnou hodnotu.



**Obrázek 2.9:** Vybrané druhy VF vedení

Přizpůsobení impedance vedení je možné nastavením jeho elektrických parametrů. Je mnoho typů vedení, ale v této práci se zaměřím pouze na varianty relevantní pro projekt. Jimi jsou koplanární vedení (obrázek 2.9b), standardní a diferenciální mikropáskové vedení (obrázky 2.9a a 2.9d) a koaxiální vedení (obrázek 2.9c).

Nastavení impedance vedení na DPS lze docílit kombinací několika parametrů. Mezi ty hlavní patří šířka vodiče (pásku), jeho tloušťka, vzdálenost od referenční vodivé plochy a permeabilita dielektrika (v tomto případě je dielektrikum směs prostředí vzduchu a laminátu, který tvoří skladbu DPS).



### ■ Mikropáskové vedení

Mikropáskové vedení je vedení složené z pásku vodiče umístěném na materiálu dielektrika podloženém souvislou vodivou plochou. Pro výpočet impedance vedení byl použit vzorec ve tvaru [16]

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2} \cdot \sqrt{\epsilon_r}}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right), \quad (2.4)$$

kde  $K_{L2} = 1 + 1,5 \cdot \frac{h}{w}$ ,  $K_{C2} = 1 + \frac{h}{w}$  a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita materiálu.

### ■ Koaxiální kabel

Koaxiální vedení (obrázek 2.9c) je nejčastěji ve formě kabelu. Používá se pro připojení vysokofrekvenčního vedení mimo DPS. Koaxiální kabel má charakteristickou impedanci podle vztahu

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (2.5)$$

kde  $r_1$  je poloměr jádra,  $r_2$  je vnitřní poloměr pláště a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrika.

### ■ Koplanární vedení

Koplanární vedení (obrázek 2.9b) je velmi podobné mikropáskovému s tím rozdílem, že pásek je navíc na své vrstvě obklopen souvislou vodivou plochou, doplněnou o prošívání prokovy po okraji. Charakteristickou impedanci je možné odvodit do tvaru

$$Z_0 = \frac{60 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(kl)}{K(kl')}}, \quad (2.6)$$

$$k = \frac{S}{b},$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2},$$

$$kl' = \sqrt{1 - kl^2},$$

$$kl = \frac{\tanh \frac{\pi \cdot S}{4h}}{\tanh \frac{\pi \cdot b}{4h}},$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1 + \epsilon_r \cdot \frac{K(k)}{K(k')} \cdot \frac{K(kl)}{K(kl')}}{1 + \frac{K(k)}{K(k')} \cdot \frac{K(kl)}{K(kl')}},$$

kde  $S$  je šířka vodiče,  $H$  je výška dielektrika od referenční plochy,  $K(k)$  je funkce eliptického integrálu prvního typu a  $b = S + 2 \cdot W$  kde  $W$  je šířka izolační mezery. [17]

## ■ Diferenciální vedení

Ve zjednodušeném modelu jde o dva mikropásky s konstantní vzdáleností (obrázek 2.9d). Zde již nezáleží tolik na charakteristické impedanci  $Z_0$ , ale zajímá nás především rozdílová impedance  $Z_{\text{diff}}$ , která je ovlivněna vzájemným působením vodičů. Výpočet rozdílové impedance vychází ze vztahu [18]

$$Z_{\text{diff}} = 2 \cdot (Z_{11} - Z_{12}), \quad (2.7)$$

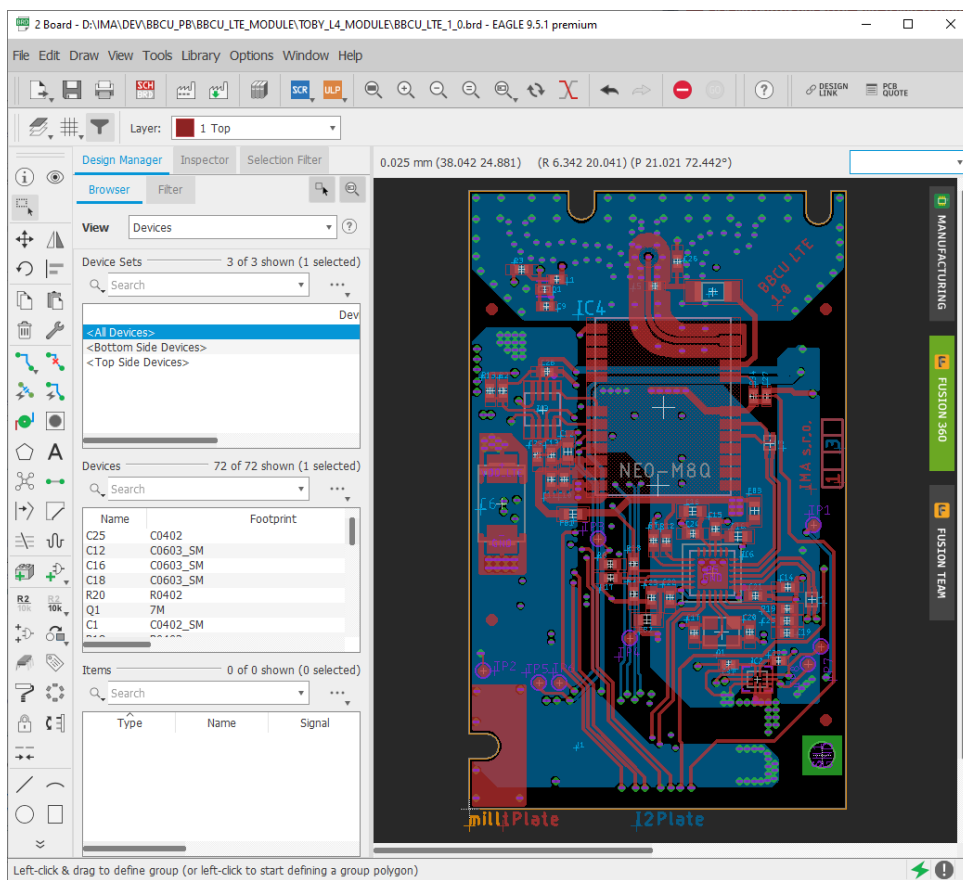
kde  $Z_{11} = Z_0$  a  $Z_{12}$  je vzájemná impedance mezi oběma vodiči. Po vyjádření proměnných vznikne vztah pro rozdílovou impedanci

$$Z_{\text{diff}} = 2 \cdot Z_0 \cdot \left(1 - 0.48 \cdot e^{-\frac{0.96 \cdot S}{H}}\right), \quad (2.8)$$

kde  $Z_0 = Z_{11}$  je charakteristická impedance jednoho mikropásku,  $S$  je vzdálenost vodičů a  $H$  je výška dielektrika od referenční plochy.

## ■ 2.7 Návrh v software EAGLE

Návrh DPS pro každou část projektu probíhal v software EAGLE, konkrétně ve verzi 9. Tento software umožňuje kreslit elektrická schémata, vytvářet a spravovat knihovny součástek a tvořit rozložení DPS do až 16 vrstev. Je možné v něm definovat pravidla pro výrobu, třídy signálů, diferenciální signály a 3D modely součástek.



**Obrázek 2.10:** Prostředí software EAGLE - návrh desky BBCU LTE



# Kapitola 3

## Praktická část

### 3.1 Principy návrhu DPS

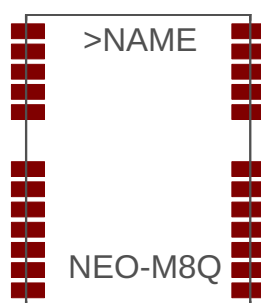
V této kapitole budou probrány použité postupy a techniky, které byly použity při návrhu a konstrukci zařízení.

#### 3.1.1 Návrh elektrického schématu

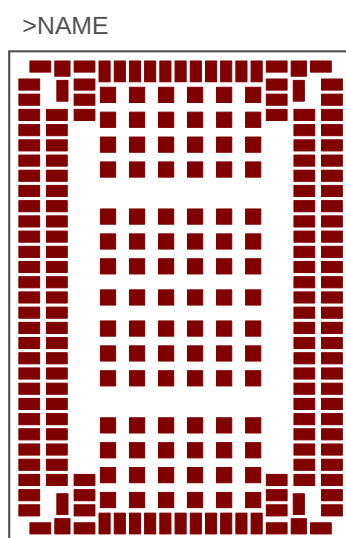
Návrh probíhal v software EAGLE společnosti Autodesk, který je zavedeným ECAD nástrojem. Při návrhu schématu se rovnou vybírají konkrétní součástky a jejich pouzdra. Součástky jako například rezistory, kondenzátory a stabilizátory mají vlastnosti odvozené od jejich pouzdra. Jde především o schopnost vyzařování maximálního ztrátového výkonu ve formě tepla. Například u kondenzátorů jsou důležité parametry jako maximální napětí, při kterém dojde k průrazu dielektrika a ekvivalentní sériový odpor.

#### 3.1.2 Tvorba vlastních knihoven součástek

Pro některé součástky bylo nutné sestavit knihovny definic. Vytvoření korektního výkresu pouzdra a správné přiřazení funkcí plošek je zásadní krok pro úspěšnou implementaci. Pro většinu běžných pouzder jsou jejich knihovny dostupné, ale v případě modulů TOBY-L4 a NEO-M8Q bylo nutné zakreslit kontaktní plošky a obrys manuálně. Na obrázku 3.2 lze vidět, jak takový návrh pouzdra vypadá. Při jeho tvorbě se vycházelo z dokumentů integračního manuálu [19] a technické dokumentace modulu [12]



**Obrázek 3.1:** Rozmístění plošek a tvar modulu NEO-M8Q [20]

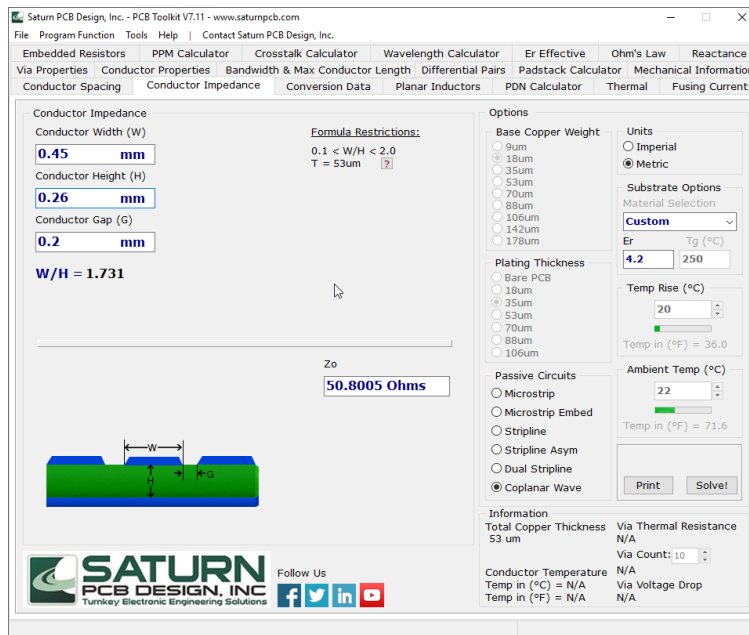


**Obrázek 3.2:** Rozmístění plošek a tvar modulu TOBY-L4

### ■ 3.1.3 Návrh DPS

Eagle umožňuje definovat tzv. třídy spojů a do nich je možné přiřadit signály, případně sběrnice. Třídám lze pak nastavit pravidla pro šířku vodiče, izolační mezeru mezi rozlitymi plochami mědi nebo jinými vodiči a velikost vrtáku při vytváření prokovů. Pro definici diferenciálního vedení je třeba pojmenovat vodiče páru tak, aby názvy končily znaky `_N` a `_P`. To ulehčí proces kreslení spojů. Za prvé software EAGLE sám dodrží definované vzdálenosti, za druhé lze použít nástroj pro souvislé kreslení diferenciálních vodičů.

Pro výpočet parametrů vedení s řízenou impedancí byl využit software Saturn PCB Toolkit [21]. Je to freeware nabízející různé druhy výpočtů pro konstrukci a návrh DPS.



Obrázek 3.3: Software Saturn PCB Toolkit

Nejprve byla zvolena tloušťka dielektrika

$$H = 270 \mu\text{m}$$

a tloušťka vodiče vrchní a spodní strany spojů

$$t = 18 \mu\text{m}.$$

Tloušťka dielektrika byla zvolena na základě dostupného materiálu výrobce a je korigována pro vliv laminace, která celkovou tloušťku skladby DPS mírně zeslabí.

Pro diferenciální mikropáskové vedení hodnoty  $Z_{\text{diff}} = 90 \Omega$  byly určeny hodnoty

$$W = 285 \mu\text{m} \text{ a } S = 150 \mu\text{m},$$

kde  $W$  je šířka vodiče a  $S$  je šířka mezery mezi vodiči. Výsledná diferenciální impedance při  $\epsilon_r = 4,8$  je  $Z_{\text{diff}} = 87,708 \Omega$ .

Pro mikropáskové koplanární vedení hodnoty charakteristické impedance  $Z_0 = 50 \Omega$  byly určeny hodnoty

$$W = 450 \mu\text{m} \text{ a } G = 200 \mu\text{m},$$

kde  $W$  je šířka vodiče a  $G$  je izolační mezera mezi vodičem a kontinuální plochou. Výpočet programu je omezen a počítá s celkovou tloušťkou vodiče po pokovení  $T = 53 \mu\text{m}$ . Výsledná charakteristická impedance koplanárního vedení při  $\epsilon_r = 4,8$  je  $Z_{\text{diff}} = 48,7029 \Omega$ . Koplanární vedení bylo zvoleno především z důvodu vysokého útlumu mezi jednotlivými vedeními.

### ■ 3.1.4 Požadavky na výrobu DPS

Pro řízenou impedanci vedení bylo nutné dodržet specifické tloušťky vrstev. Ty byly pro všechny desky definovány identicky, na základě spočtených parametrů v kapitole 3.1.3.

Výroba se zadává zasláním výrobních podkladů ve formátu Gerber RS-274X výrobcí, který je zkontroluje proti svým technologickým možnostem, případně vytváří panel pro výrobu více kusů. Spolu se soubory je třeba komunikovat všechny specifické požadavky - například skladbu vrstev, barvu nepájivého potisku a povrchovou úpravu. Ta nemusí být žádná, ale tím by nebyla odmaskovaná měď chráněna proti korozi.

Jako výrobní materiál byl zvolen IS400 [22] z nabídky výrobce Pragoboard. Zvolen byl pro jeho dobrou teplotní stálost, spolehlivost a širokou nabídku rozměrů. Jeho relativní permitivita je  $\epsilon_r = 4,8$ .

### ■ 3.1.5 Princip výroby DPS

Výroba začíná vytvrzením ochranné vrstvy podle vzoru na laminátovém jádru pokrytém měděnou vrstvou. Měď se odstraní a následuje čištění a laminace. Během té se k jádru s vyleptaným vzorem tepelně nalisují další vrstvy laminátu a mědi. Do desky se poté vyvrtaří všechny díry a začne proces pokovení těchto děr, aby se vytvořily vodivé spoje mezi vrstvami. Po pokovení je třeba nanést fotocitlivou vrstvu, osvítit vzor a finálně odleptat vnější vrstvy desky. Jako předposlední krok se z obou stran nanese maska pro ochranu. Zbylé odhalené plochy projdou finální povrchovou úpravou. Běžným procesem je HASL (Hot Air Surface Leveling), který spočívá v pokrytí plošek standardní, či bezolovnatou pájkou. Jednou z dalších možností je ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold), u kterého se plošky nejdříve pokryjí niklem a posléze tenkou vrstvou zlata.

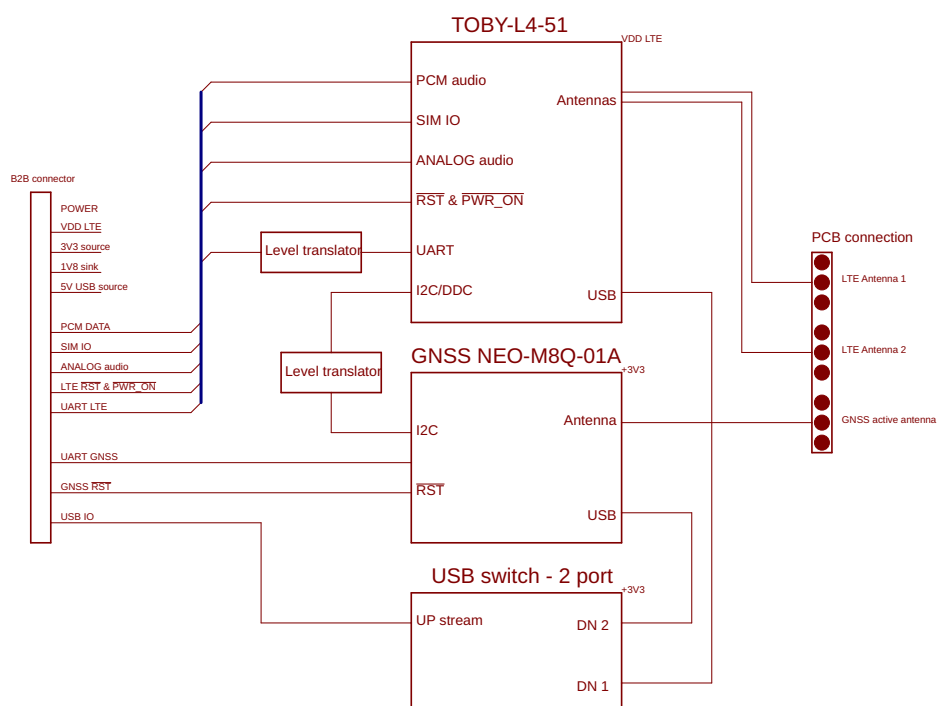
Pro jednodušší proces osazování byla vytvořena i šablona pro nanesení pájecí pasty. Tu tvoří 120  $\mu\text{m}$  nerezový plech, do kterého jsou laserem vypálené otvory. Její výroba byla taktéž objednána u výrobce Pragoboard.

## ■ 3.2 Návrh modulu BBCU LTE

Již na začátku vývoje bylo dohodnuto, že konstrukce by měla vycházet z původního modulu Cinterion AH3-W [8]. Pro vybrané komponenty s ohledem na stanovené požadavky ze sekce 2.3 bylo vytvořeno elektrické a blokové schéma zapojení a současně byly definovány další nutné součástky, jako



filtrační kondenzátory, rezistory a převodníky napětí. V neposlední řadě byly specifikovány konektory pro připojení VF signálů. [23]



Obrázek 3.4: Blokové schéma modulu BBCU LTE

### 3.2.1 LTE TOBY-L406-51

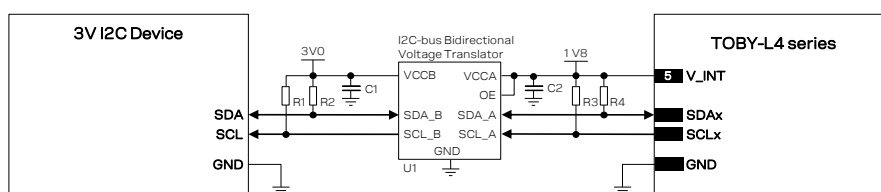
Dále bude modul označován pouze TOBY L4. Pro veškerou komunikaci s hlavním procesorem je použita sběrnice USB. Ta je diferenciální, takže se návrh musí řídit standardními pravidly pro takové vedení [24]. USB bylo vyvedeno na modulový konektor. LTE modul je přizpůsoben pro napájení z jednoho li-ion článku, takže je možné ho rovnou připojit na napětí zálohového akumulátoru, připojeného na periferní desku. Dále je nutné připojit na konektor sběrnice I2S a UART pro konfiguraci. Nakonec je třeba vyvést signály pro komunikaci se SIM kartou, kterou je možné vložit do konektoru na periferní desce.

### 3.2.2 GNSS NEO-M8Q

Použitý GNSS modul umožňuje komunikaci po sběrnici I<sup>2</sup>C, UART i USB. Bohužel, aktuální firmware modulu TOBY-L406-51 zatím neumožňuje přímou komunikaci s NEO-M8Q pomocí I<sup>2</sup>C. I přes to bylo rozhraní připojeno,

protože podle plánu výrobce by v budoucnu tato funkcionalita měla být implementována. Projekt bude tedy používat USB pro primární komunikaci s GNSS modulem. Pro případ možného využití je pak propojeno i rozhraní UART.

Vzhledem k tomu, že všechny vstupně výstupní obvody TOBY-L406-51 pracují s napětím 1,8 V, byl použit pro podle obrázku 3.5 převodník napětových úrovní TCA9406 [25]. TCA9406 převádí úrovně obousměrně a je určen primárně pro I<sup>2</sup>C - integruje potřebné pull-up rezistory, což je přínosné vzhledem k omezenému prostoru. Tento obvod je rozdělený na část A a část B. Část A je připojena k sběrnici na nižším napětí, část B k sběrnici na vyšším napětí.



Obrázek 3.5: Vzájemné propojení GNSS a LTE modulu [19]

### 3.2.3 USB

Pro komunikaci s oběma moduly bude použito USB. Z důvodů zachování částečné kompatibility bylo rozhodnuto využít stávající připojení signálů USB přes 80 pinový B2B modulový konektor. Protože jsou na desce 2 zařízení které budou po USB komunikovat, bylo nutné mezi ně zapojit USB switch. Byl vybrán integrovaný obvod USB2422. Podporuje rychlosti kategorie high-speed, tudíž je pro naši aplikaci ideální. Propojení s LTE a GNSS moduly je přímočaré, v cestě je zapojena tlumivka pro redukci souhlasného rušení. GNSS modul má již integrovaný pull-up rezistor [26] pro konfiguraci USB 2.0 FS rychlosti. U modulu TOBY L4 probíhá konfigurace rychlosti přenosu dynamicky, s tím že umí maximum specifikace USB 2.0 [12].

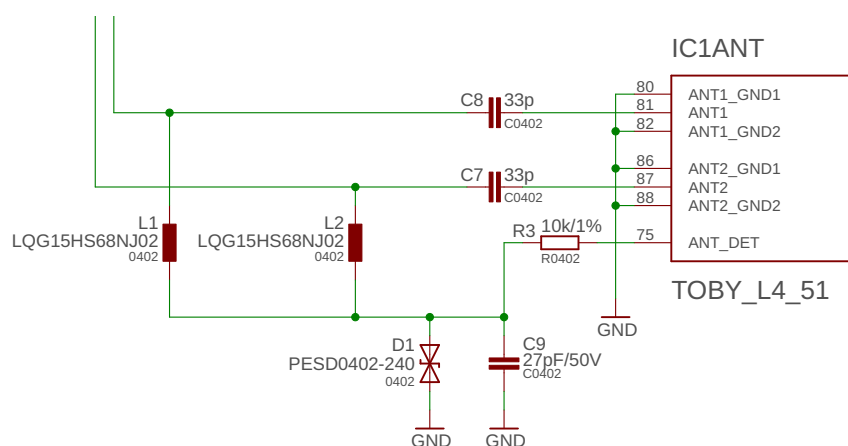
### 3.2.4 Napájení

Modul TOBY L4 je určený pro přímé napájení z jednoho lithiového článku protože rozsah napětí které akceptuje je 3,4 až 4,4 V. Toto napájení je připojeno paralelně přes několik kontaktů modulového konektoru pro zvýšení jejich proudové zatížitelnosti. Protože je ale jeho odběr z proudového hlediska velmi nesouvislý (zvláště pokud je aktivní vysílání), bylo rozumné nespolehat se pouze na filtraci napájecího napětí na nadřazené desce a modul byl doplněn o několik filtračních kondenzátorů tak, aby byly co nejlíže napájecím ploškám LTE modulu. Pro ostatní obvody stačí napájení 3,3 V, které je dodáno také přes modulový konektor. Každý integrovaný obvod má své adekvátní filtrování

napájení. Pro napájení převodníků pro PCM a napětovou referenci bylo ještě na konektor napojeno napětí 1,8 V, tentokrát ale v opačném směru, jelikož ho poskytuje modul TOBY L4.

### 3.2.5 Připojení vysokofrekvenčních signálů

Pro propojení jsou použity odhalené plošky s roztečí 2,54 mm korespondující s pružinovými konektory na nadřazené desce. Protože nezamaskovaná místa mědi budou při povrchové úpravě pozlacena, bude spojení dostatečně spolehlivé. Navíc modul není určen k časté výměně, takže se kontaktní plochy brzy neopotřebují.

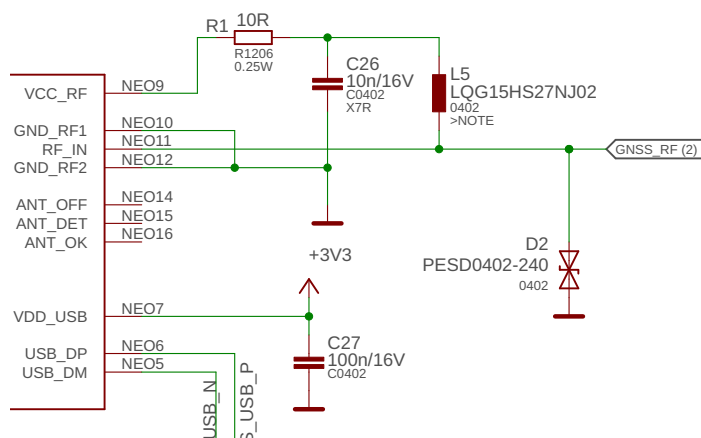


Obrázek 3.6: Zapojení detekčního obvodu LTE antén

Pro modul TOBY L4 byla implementována detekce přítomnosti antén (obrázek 3.6). Modul tuto skutečnost zjistí na základě měření odporů antén vůči zemi. To zajistí generováním stejnosměrného proudu na kontaktu ANT\_DET. Signál je pak připojen k vodičům antén přes tlumivé indukty, které mají vlastní rezonanční frekvenci v okolí 1 GHz, což znamená, že v použitelném pásmu LTE bude detekční obvod co nejméně ovlivňovat přenos výkonu. Pro stejnosměrný proud se cívky chovají jako zkrat. R3 a C9 slouží jako RC filtr a ochrana před zkratem, D1 je pro ESD ochranu. Kondenzátory C7 a C8 pak zajišťují blokování stejnosměrné složky generované detekčním obvodem do vstupu integrovaného LNA<sup>1</sup>. [19]

Obvod mezi vstupem GNSS modulu a kontaktní ploškou slouží k poskytnutí napájení pro aktivní anténu, se kterou tento návrh počítá. Vzhledem k plánovanému umístění zařízení do vozidla, bude nutné umístit anténu na vhodné místo. Aby se vykompenzovaly ztráty výkonu na vedení koaxiálního kabelu, integrují se do antén zesilovače LNA. Přijatý signál se tedy nejprve zesílí a zvýší tak odstup užitečného signálu od šumu. Takové napájení je

<sup>1</sup>Nízko-šumový zesilovač, používaný v RF oblasti



**Obrázek 3.7:** Zapojení napájecího obvodu pro aktivní GNSS anténu

možné vytvořením tzv. DC bias napětí na vedení, jak lze vidět na obrázku 3.7. Napájení 3 V je filtrováno RC článkem a odděleno tlumivkou L5, blokovací kondenzátor má modul integrovaný na vstupu. Rezistor R1 slouží i jako ochrana proti zkratu, proto byl zvolen ve větším pouzdře, aby mohl vyzářit případné ztrátové teplo. [26]

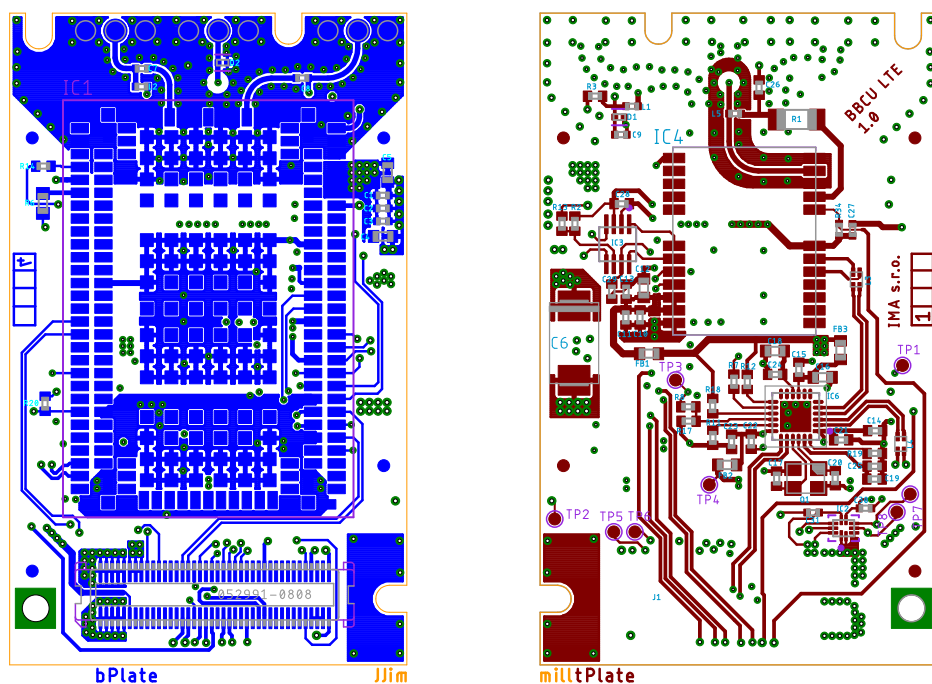
### 3.2.6 UART

K testovacím účelům a případnému využití do budoucna byly na hlavní konektor propojeny UART rozhraní obou modulů. Pro konverzi napěťové úrovně na straně TOBY L4 byl použit napěťový převodník firmy Texas Instruments SN74AVC2T245. Tento obvod byl zvolen kvůli jeho malému pouzdru UQFN-10 a je pouze jednosměrný. Pro každý z jeho dvojice portů je možné konfigurovat směr průchodnosti v závislosti na směru signálů RX a TX. Úrovně modulu GNSS jsou již na napětí 3 V.

### 3.2.7 Návrh PCB

Vzhledem k rozměrům TOBY L4, NEO M8Q a požadované velikosti modulu bylo nutné desku vytvořit s oboustranným osazením.

Na spodní straně bude osazen modul TOBY L4 ze dvou důvodů: je to největší součástka, na vrchní straně se tak vytvoří dost místa pro ostatní součástky, a dále pak vedení k anténám nebude muset procházet skrz prokov, ale bude na stejné vrstvě jako kontaktní plošky. Lze si toho povšimnout na obrázku 3.8a. Je zde taktéž umístěn propojovací konektor Molex 52991-0808 (obrázek 3.9).



(a) : Spodní strana desky BBCU LTE

(b) : Vrchní strana desky BBCU LTE

**Obrázek 3.8:** Vrstvy DPS modulu BBCU LTE

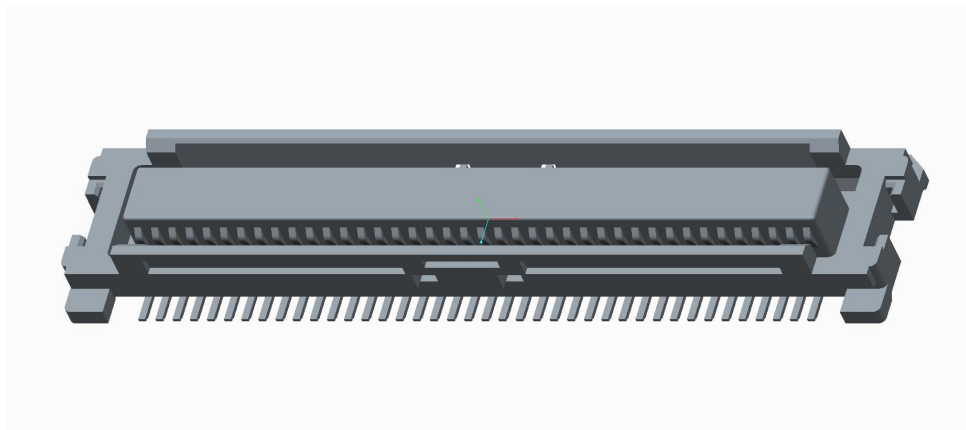
Na vrchní straně BBCU LTE je umístěn GNSS modul NEO M8Q, USB switch, oba převodníky napětových úrovní a další převážně pasivní součástky. Modul využívá napájecí zdroje nadřazených desek, tudíž se všechny komponenty na omezený prostor vejdou. Zároveň obsahuje převážnou většinu ostatních součástek, které bude pak jednodušší na této straně osadit. [27]

### 3.3 BBCU LTE testbed

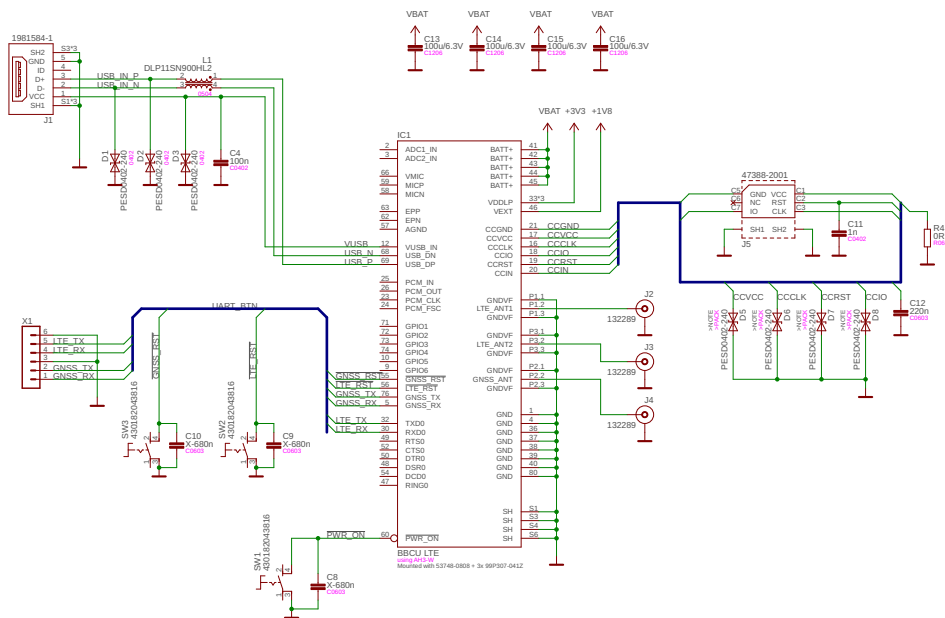
BBCU LTE testbed je deska sloužící hlavně pro testování funkčnosti modulů BBCU LTE nezávisle na aktuální funkčnosti BBCU MB a PB. Obsahuje potřebné zdroje, konektory, slot pro SIM kartu a tlačítka pro zapnutí a reset obvodů.

#### 3.3.1 Elektrické schéma

Stejně jako u ostatních návrhů se začalo vytvořením elektrického schématu. Návrh vychází především ze zapojení použitého na BBCU PB. To bylo potřeba doplnit o 2 napájecí zdroje podle manuálu [19]. V obou případech jde o lineární stabilizátory s nízkým ztrátovým napětím. Stabilizátory zajišťují napájení



Obrázek 3.9: Konektor Molex 52991-0808



Obrázek 3.10: Připojení BCCU LTE v rámci BCCU LTE testbed

4,1 V pro větev LTE modulu a 3,3 V pro GNSS modul a ostatní obvody.

### 3.3.2 Návrh DPS

Při návrhu DPS pro BCCU LTE testbed byl kladen důraz hlavně na jednoduchost. Skladba desky je identická s ostatními - 4 vrstvy.

Nejprve byla zvolena velikost desky tak, aby se na ní všechny komponenty vešly. Následovně byla umístěna součástka pro BCCU LTE. Ta byla vytvořena již při předchozím vývoji. Důležité bylo vytvořit koplanární vedení (obrázek 2.9b) o impedanci  $50 \Omega$  pro připojení vysokofrekvenčních signálů z pružinových



**Obrázek 3.11:** Konektor SMA pro horizontální SMD montáž

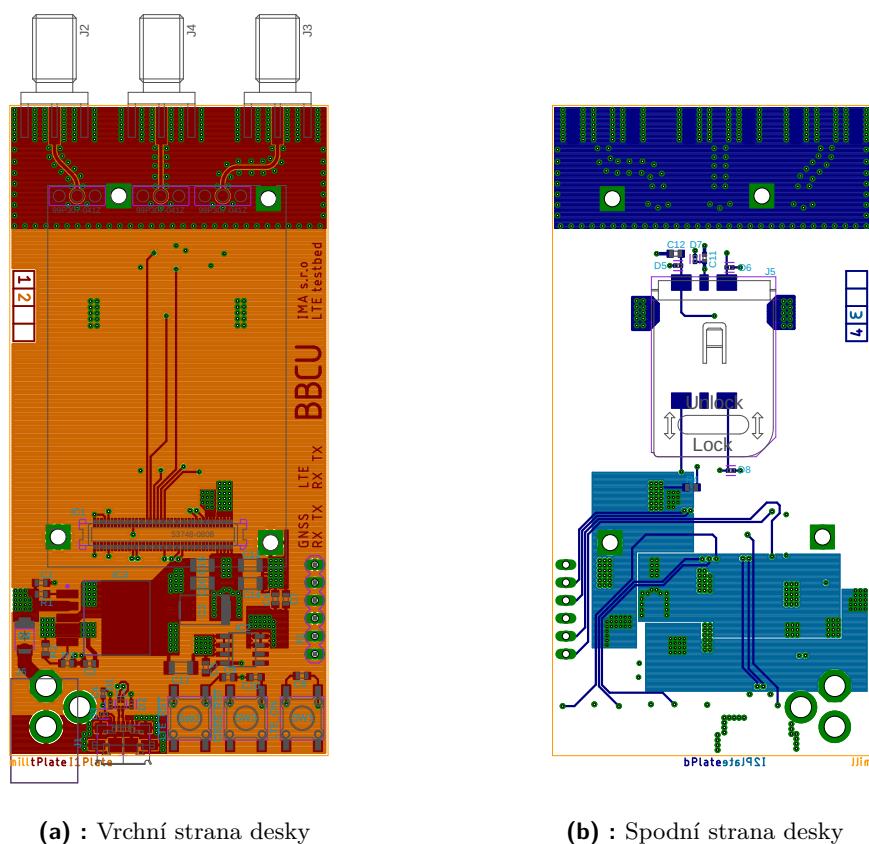
blokových konektorů na horizontálně umístěné SMA (obrázek 3.11) konektory. Na ty budou připojeny antény koaxiálním kabelem. Na jižní části desky byla umístěna tři tlačítka, USB konektor typu micro B a válcový napájecí zásuvkový konektor. Pak již stačilo umístit hřebínkový konektor pro testovací rozhraní UART (sekce 2.5.2), dále zásuvku na SIM kartu ze spodní strany a k ní potřebné blokovací a filtrační kondenzátory. Blízko zásuvky SIM byly k signálům připojeny TVS diody pro ochranu proti ESD.

PCM zvuková sběrnice není připojena a chybí i zvukový kodek, protože deska bude sloužit pro testování internetové konektivity a buňková telefonie není primárním cílem.

Do vzniklého místa byly umístěny napájecí stabilizátory včetně potřebné filtrace. K USB konektoru byl situován dvojitý induktor se společným jádrem pro filtraci souhlasného rušení a TVS diody na datové vodiče pro ESD ochranu. Vrchní vrstva pak byla využita primárně jako vrstva pro signálové spoje. Druhá vrstva obsahuje pouze rozlitou zem pro vytvoření koplanárního vedení se specifickou impedancí. Třetí vrstva slouží pro distribuci napájecích napětí. Spodní vrstva je znovu signálová. Pro vedení diferenciálního signálu USB byly znovu dodrženy již určené parametry vedení.

## ■ 3.4 BBCU PB 2.0

Součástí této práce bylo zároveň přizpůsobit BBCU PB novým požadavkům. BroadR-Reach bylo nutné připojit na systémový konektor a zároveň bylo třeba upravit některé podpůrné části obvodů pro nový LTE modul.



(a) : Vrchní strana desky

(b) : Spodní strana desky

**Obrázek 3.12:** DPS desky BBCU LTE testbed

### 3.4.1 Úprava vedení pro BroadR-Reach

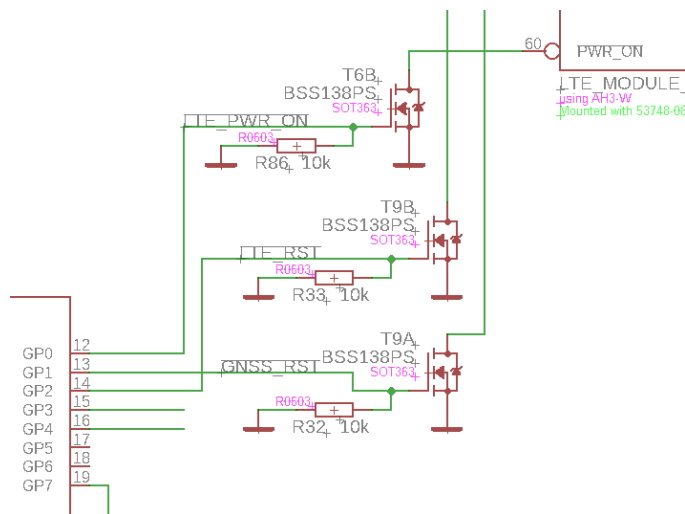
BroadR Reach je plně duplexní rozhraní fyzické vrstvy pro Ethernet, je založeno na PAM-3 modulaci [1], která je velmi robustní a jako fyzické médium využívá pouze jeden diferenciální pár.

Na periferní desku je signál přiveden skrz propojovací konektory. Pro vedení byly využity vodiče místo jednoho z nevyužitých portů UART, pouze byly přizpůsobeny pro diferenciální signály. Na BBCU PB bylo nutné odstranit řadič RS232 a jeho podpůrné komponenty. Vzhledem k tomu, že potřebná EMI filtrace a ESD ochrana jsou přítomny na BBCU MB, lze připojit vodiče přímo na systémový konektor automobilu bez dalších přizpůsobení. Je třeba dodržet diferenciální impedanci o nominální hodnotě  $100\ \Omega$  [1].



### 3.4.2 Přizpůsobení desky pro bezdrátový modul

I přes snahu zachovat z původního návrhu co nejvíce prvků, bylo potřeba BBCU PB přizpůsobit. Pro adaptaci desky na nový modul BBCU LTE bylo nutné přidat jeden tranzistor T6 pro ovládání signálu PWR\_ON (obrázek 3.13). Jde o MOSFET s kanálem typu N, který je v open-drain zapojení. Po přivedení kladného napětí na gate tranzistor přivede jeho drain a tím i vstup PWR\_ON na potenciál země. Gate tohoto tranzistoru je ovládán výstupem z expandéru MCP23008 a mikrokontroléru PMIC (procesor pro správu napájení). Tranzistor T9A a T9B pak plní stejnou funkci, ovšem pro reset signály.



Obrázek 3.13: Tranzistory pro ovládání power a reset signálů

Pro připojení vysokofrekvenčních signálů byly zvoleny konektory od výrobce Mill-Max pro povrchovou montáž. Mají rozteč 2,54 mm a výšku stlačeného kontaktu 3,6 mm [28].

Signálový konektor byl zachován s mírnými změnami. Pro napájení 3,3 V byly využity 3 kontakty najednou pro zvýšení proudové zatížitelnosti. Také byla změněna funkcionality kontaktů dedikovaných pro GPIO na UART rozhraní GNSS modulu.



## Kapitola 4

### Závěr

Cílem práce bylo zvolit vhodné řešení bezdrátové komunikace pro novou generaci automotive multimediální jednotky BBCU. Důvodem bylo zastaralé původní řešení pracující s technologií 3G UTMS. Nová generace by již měla pracovat s technologiemi 4G LTE-Advanced a pozičním satelitním systémem GNSS.

Nejprve bylo nutné vytvořit průzkum trhu komerčně dostupných komunikačních modulů. Vzhledem k tomu, že výrobce původního modulu novou variantu s potřebnými technologiemi nenabízí, byl zvolen podobný formát pro jednoduchost jeho implementace. Komerčně dostupné moduly byly posouzeny souborem sestavených požadavků a úzkého výběru byly vybrány 4 moduly. Nakonec byl zvolen modul výrobce u-blox TOBY-L4106 z důvodu využití technologie LTE-Advanced, podpory frekvenčních pásem v ČR, kompatibility s použitými rozhraními a obsáhlou dokumentací. Doplnuje ho přijímač GNSS NEO-M8Q stejného výrobce.

Praktická část se věnovala vytvoření návrhu BBCU LTE. Jde o desku, která kombinuje oba vybrané komunikační moduly. Za cíl má zajistit připojení a přizpůsobení všech využívaných rozhraní ke komunikaci mezi procesorem a moduly. Výhodou takového formátu je možnost adaptace pro budoucí použití moderních technologií, například přístup k 5G sítím či přesnějším lokalizačním službám.

Jako doplněk byla navržena deska BBCU LTE testbed, která má sloužit pro testování funkčnosti modulu. Obstará potřebné napájení a umožní připojení k modulu pomocí USB Micro B konektoru.

Součástí práce bylo rovněž provedení revize desky BBCU PB. Druhá verze této desky je mírně přizpůsobena novému komunikačnímu modulu a zpřístupňuje vedení pro rozhraní BroadR-Reach na systémový konektor pro připojení k elektronice automobilu.

V průběhu vývoje proběhlo několik interních revizí, které odhalily nedostatky

návrhu. Jednalo se například o nesprávné pozice plošek pro přenos VF signálů. Tyto nedostatky byly opraveny a zaneseny do dokumentace.

V důsledku dodatečných změn specifik projektu a vlivem změny architektury modulu byl vývoj opožděn. Po dohodě s vedoucím práce probíhá výroba DPS a distribuce potřebných součástek v době odevzdání práce. V nejbližším možném termínu budou desky osazeny, sestaveny a otestovány. Následně bude probíhat implementace ovladačů pro linuxové jádro a vývoj aplikace, což však není předmětem této práce.

Výsledkem práce je návrh elektroniky komunikačního modulu a jeho testovací přípravku pro novou generaci automotive multimediální jednotky.

V rámci dalšího vývoje považuji za vhodné zaměřit se na optimalizaci napájení a jeho správu při nečinnosti. V tuto chvíli není možné efektivně vypnout všechny obvody na modulu BBCU LTE tak, aby jeho spotřeba byla co nejnižší. To bude možné vyřešit komplexní správou napájení pomocí PMIC na desce BBCU MB. Takové řešení by kromě řízení stavu LTE modulu umožňovalo kontrolovat jeho aktuální odběr a případně vypínat celé napájení modulu.

## Příloha A

### Bibliografie

1. *BroadR-Reach Physical Layer Transceiver Specification For Automotive Applications* [online]. IEEE 802, 2014. Dostupné také z: [http://www.ieee802.org/3/1TPCESG/public/BroadR\\_Reach\\_Automotive\\_Spec\\_V3.0.pdf](http://www.ieee802.org/3/1TPCESG/public/BroadR_Reach_Automotive_Spec_V3.0.pdf).
2. *Základní informace o LTE* [online]. Český telekomunikační úřad, 2017 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://digi.ctu.cz/lte-rk/olte>.
3. MYUNG, Hyung G. Technical overview of 3GPP LTE. *Polytechnic University of New York*. 2008.
4. LI, Ye; STÜBER, Gordon. *Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications*. Springer Science & Business Media, 2006.
5. GHOSH, A.; RATASUK, R.; MONDAL, B.; MANGALVEDHE, N.; THOMAS, T. LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology. *IEEE Wireless Communications*. 2010, roč. 17, č. 3, s. 10–22.
6. DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKOLD, Johan. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Amsterdam: Academic press, 2013. ISBN 978-0-12-419985-9.
7. GROVES, Paul. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Boston: Artech House, 2013. ISBN 9781608070053.
8. [online] [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://etechcomponents.com/products/gemalto-ah3-automotive-wireless-m2m-module/>.
9. *Cinterion ELS81 Specification* [online]. Gemalto, 2018 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [https://eshop.sectron.cz/UserFiles/Image/ELS81\\_datasheet.pdf](https://eshop.sectron.cz/UserFiles/Image/ELS81_datasheet.pdf).
10. *Quectel AG35 Specification* [online]. 2018 Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., 2018 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel\\_AG35\\_LTE\\_Specification\\_V1.3.pdf](https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel_AG35_LTE_Specification_V1.3.pdf).

11. *AirPrime AR7594 IoT Module for the Automotive Industry* [online]. Sierra Wireless, 2020 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.sierrawireless.com/products-and-solutions/embedded-solutions/products/ar7594/>.
12. *TOBY-L4 series Data Sheet* [online]. u.blox, 2019 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/TOBY-L4\\_DataSheet\\_\(UBX-16009856\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/TOBY-L4_DataSheet_(UBX-16009856).pdf).
13. *I2C-bus specification and user manual* [online]. 2014 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
14. TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Sériový port RS-232C* [online]. Root.cz, 2008 [cit. 2020-04-15]. ISSN 1212-8309. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/seriovy-port-rs-232c/>.
15. *USB 2.0 Specification* [online]. USB-IF [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>.
16. ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů - principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
17. WADELL, Brian C. *Transmission line design handbook*. Artech House, 1991. ISBN 0-89006-436-9.
18. BROOKS, Douglas. *Differential Impedance: What's the Difference?* 1998.
19. *TOBY-L4 series System Integration Manual* [online]. u.blox, 2019 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/TOBY-L4\\_SysIntegrManual\\_\(UBX-16024839\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/TOBY-L4_SysIntegrManual_(UBX-16024839).pdf).
20. *u-blox 8 / M8 GNSS modules - Data sheet* [online]. u.blox, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-15031086>.
21. *Saturn PCB Design Toolkit* [online]. Saturn PCB [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [https://saturnpcb.com/pcb\\_toolkit/](https://saturnpcb.com/pcb_toolkit/).
22. *IS400 Data Sheet* [online]. Isola Group, 2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.isola-group.com/wp-content/uploads/data-sheets/is400.pdf>.
23. RUMNEY, Moray. *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9781118799475.
24. JOHNSON, Howard; GRAHAM, Martin. *High-speed signal propagation : advanced black magic*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall/PTR, 2003. ISBN 0-13-084408-X.
25. *TCA9406 Datasheet* [online]. Texas Instruments, 2010 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9406.pdf>.







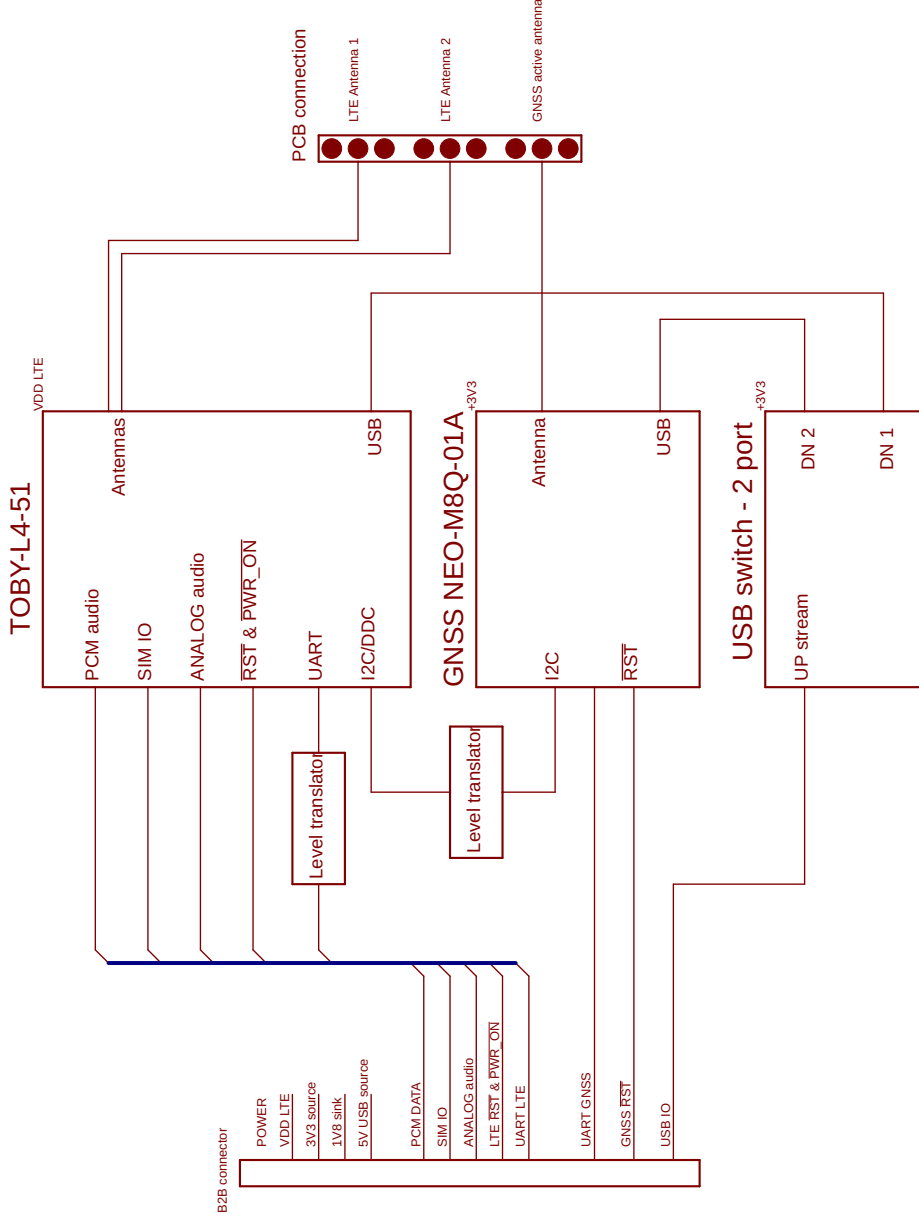


## **Příloha B**

### **Schéma zapojení BBCU LTE**

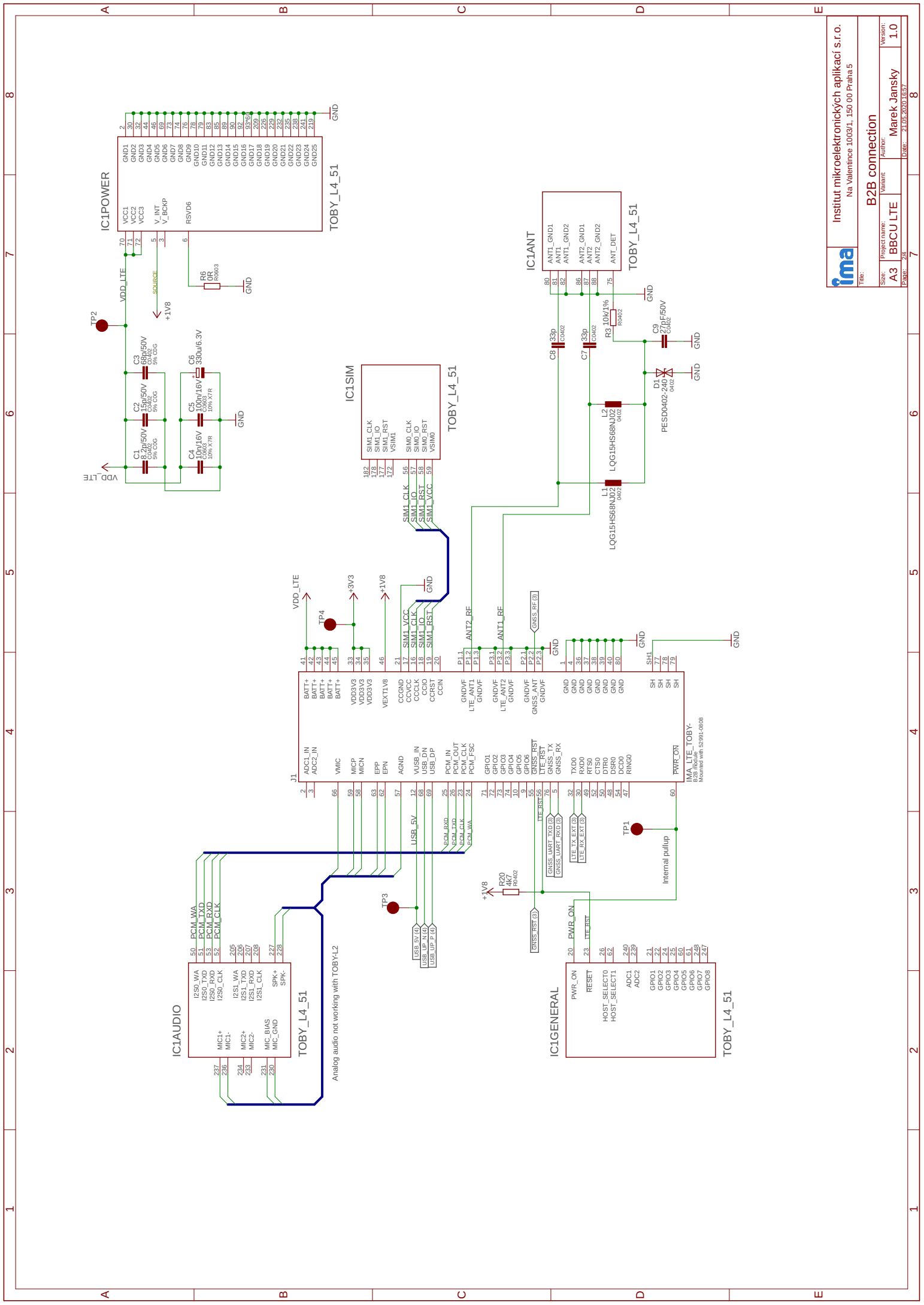
# BBCU LTE MODULE

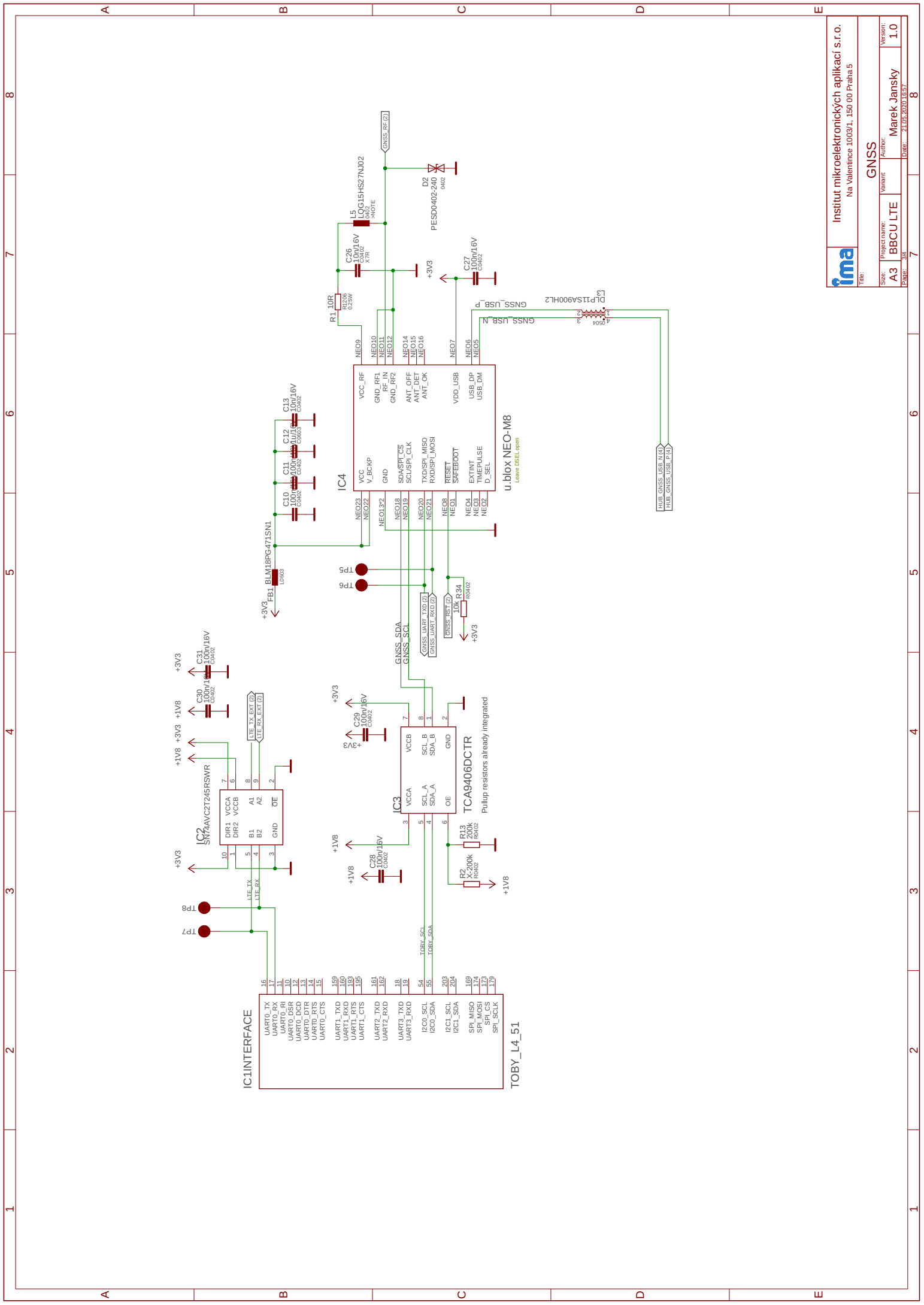
- 0.0 - Initial release
- 0.1 - Move from I2C on GNSS to USB
  - Adding USB switch
  - Active GNSS antenna circuitry
- 0.2 - Recreating module package due to incorrect orientation
- 1.0 - Level translation on LTE UART, 1V8 -> 3V3



Obsah:

- 1 - Diagram
- 2 - B2B connection
- 3 - GNSS
- 4 - USB HUB





IC1 INTERFACE

16	UART0_TX
17	UART0_RX
18	UART0_CTS
19	UART0_DTR
20	UART0_DCD
21	UART0_DSR
22	UART0_DSD
23	UART0_DTD
24	UART0_DTE
25	UART0_RTS
26	UART0_RTS
27	UART0_CTS
28	UART0_CTS
29	UART1_TXD
30	UART1_RXD
31	UART1_TXD
32	UART1_RXD
33	UART1_CTS
34	UART1_CTS
35	UART2_TXD
36	UART2_RXD
37	UART2_TXD
38	UART2_RXD
39	UART3_TXD
40	UART3_RXD
41	UART3_TXD
42	UART3_RXD
43	I2C0_SCL
44	I2C0_SDA
45	I2C1_SCL
46	I2C1_SDA
47	I2C2_SCL
48	I2C2_SDA
49	SPI_MISO
50	SPI_MOSI
51	SPI_CS
52	SPI_CS
53	SPI_SCLK

TOBY\_L4\_51

IC2

10	DIR1	VCCA
11	DIR2	VCCB
12	DIR3	VCCB
13	DIR4	VCCB
14	DIR5	VCCB
15	DIR6	VCCB
16	DIR7	VCCB
17	DIR8	VCCB
18	DIR9	VCCB
19	DIR10	VCCB
20	DIR11	VCCB
21	DIR12	VCCB
22	DIR13	VCCB
23	DIR14	VCCB
24	DIR15	VCCB
25	DIR16	VCCB
26	DIR17	VCCB
27	DIR18	VCCB
28	DIR19	VCCB
29	DIR20	VCCB
30	DIR21	VCCB
31	DIR22	VCCB
32	DIR23	VCCB
33	DIR24	VCCB
34	DIR25	VCCB
35	DIR26	VCCB
36	DIR27	VCCB
37	DIR28	VCCB
38	DIR29	VCCB
39	DIR30	VCCB
40	DIR31	VCCB
41	DIR32	VCCB
42	DIR33	VCCB
43	DIR34	VCCB
44	DIR35	VCCB
45	DIR36	VCCB
46	DIR37	VCCB
47	DIR38	VCCB
48	DIR39	VCCB
49	DIR40	VCCB
50	DIR41	VCCB
51	DIR42	VCCB
52	DIR43	VCCB
53	DIR44	VCCB
54	DIR45	VCCB
55	DIR46	VCCB
56	DIR47	VCCB
57	DIR48	VCCB
58	DIR49	VCCB
59	DIR50	VCCB
60	DIR51	VCCB
61	DIR52	VCCB
62	DIR53	VCCB
63	DIR54	VCCB
64	DIR55	VCCB
65	DIR56	VCCB
66	DIR57	VCCB
67	DIR58	VCCB
68	DIR59	VCCB
69	DIR60	VCCB
70	DIR61	VCCB
71	DIR62	VCCB
72	DIR63	VCCB
73	DIR64	VCCB
74	DIR65	VCCB
75	DIR66	VCCB
76	DIR67	VCCB
77	DIR68	VCCB
78	DIR69	VCCB
79	DIR70	VCCB
80	DIR71	VCCB
81	DIR72	VCCB
82	DIR73	VCCB
83	DIR74	VCCB
84	DIR75	VCCB
85	DIR76	VCCB
86	DIR77	VCCB
87	DIR78	VCCB
88	DIR79	VCCB
89	DIR80	VCCB
90	DIR81	VCCB
91	DIR82	VCCB
92	DIR83	VCCB
93	DIR84	VCCB
94	DIR85	VCCB
95	DIR86	VCCB
96	DIR87	VCCB
97	DIR88	VCCB
98	DIR89	VCCB
99	DIR90	VCCB
100	DIR91	VCCB

SN74AVC1245RSWR

IC3

3	VCCA
4	SCL_A
5	SCL_B
6	SDA_A
7	SDA_B
8	OE

TCA9406DCTR

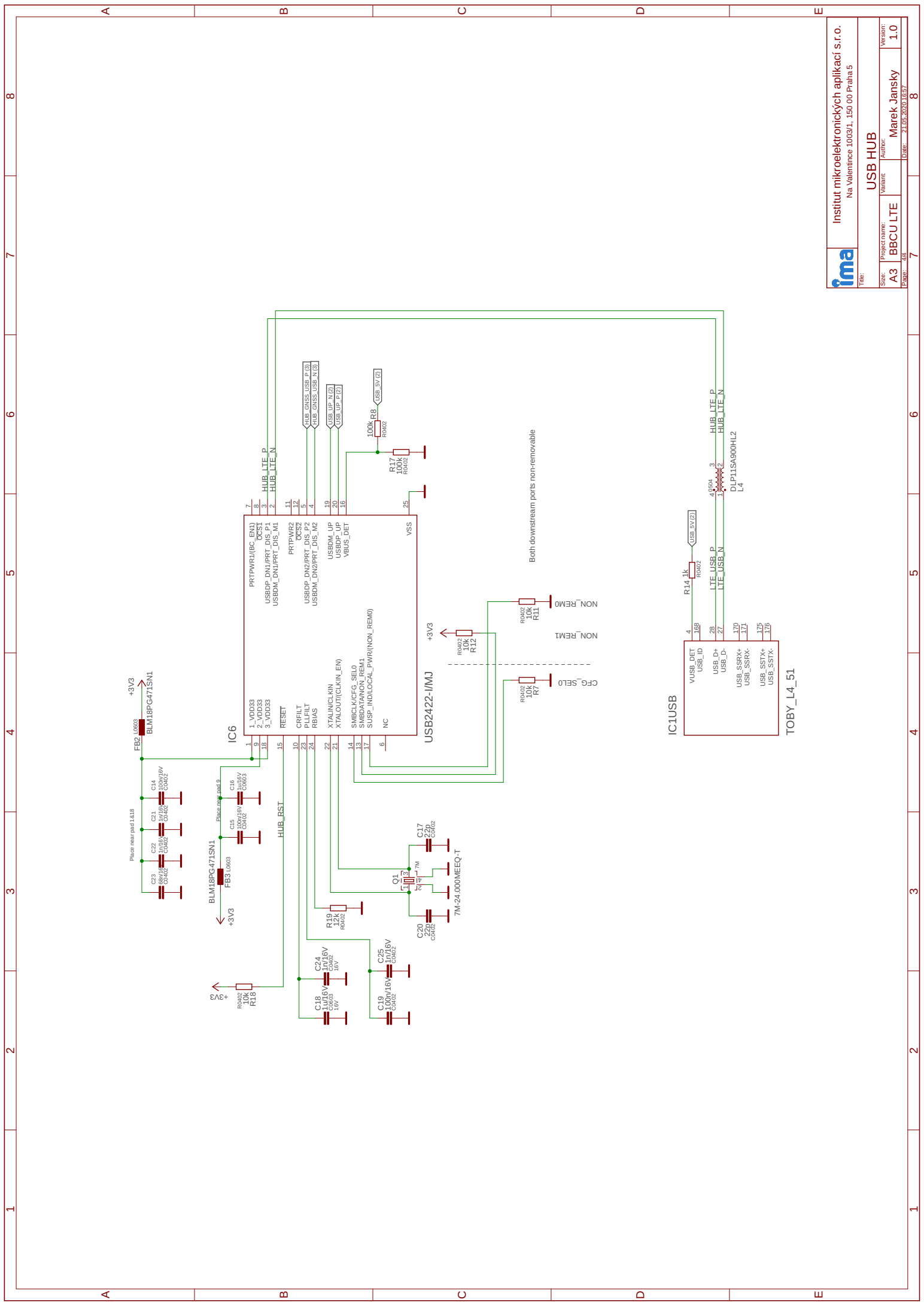
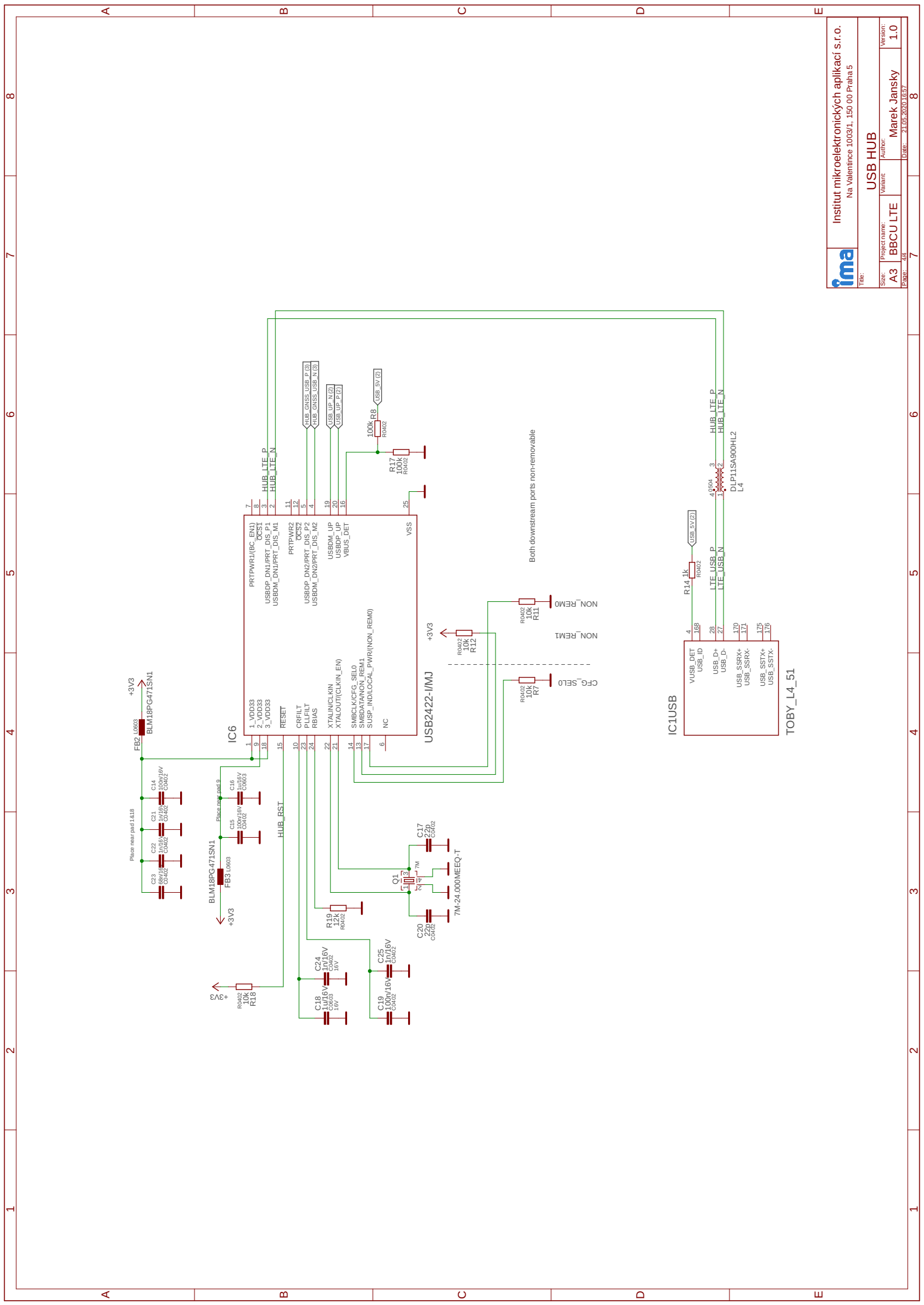
Pullup resistors already integrated

IC4

NEO01	VCC
NEO02	V_BCKP
NEO03	GND
NEO04	SDA/SPI_CS
NEO05	SCUSPI_CLK
NEO06	TX/DSP1_MISO
NEO07	RXD/SPI_MOSI
NEO08	RESET
NEO09	SAFEBOOT
NEO10	EXTINT
NEO11	TIMEPULSE
NEO12	D_SEL
NEO13	NEO01
NEO14	NEO02
NEO15	NEO03
NEO16	NEO04
NEO17	NEO05
NEO18	NEO06
NEO19	NEO07
NEO20	NEO08
NEO21	NEO09
NEO22	NEO10
NEO23	NEO11
NEO24	NEO12
NEO25	NEO13
NEO26	NEO14
NEO27	NEO15
NEO28	NEO16
NEO29	NEO17
NEO30	NEO18
NEO31	NEO19
NEO32	NEO20
NEO33	NEO21
NEO34	NEO22
NEO35	NEO23
NEO36	NEO24
NEO37	NEO25
NEO38	NEO26
NEO39	NEO27
NEO40	NEO28
NEO41	NEO29
NEO42	NEO30
NEO43	NEO31
NEO44	NEO32
NEO45	NEO33
NEO46	NEO34
NEO47	NEO35
NEO48	NEO36
NEO49	NEO37
NEO50	NEO38
NEO51	NEO39
NEO52	NEO40
NEO53	NEO41
NEO54	NEO42
NEO55	NEO43
NEO56	NEO44
NEO57	NEO45
NEO58	NEO46
NEO59	NEO47
NEO60	NEO48
NEO61	NEO49
NEO62	NEO50
NEO63	NEO51
NEO64	NEO52
NEO65	NEO53
NEO66	NEO54
NEO67	NEO55
NEO68	NEO56
NEO69	NEO57
NEO70	NEO58
NEO71	NEO59
NEO72	NEO60
NEO73	NEO61
NEO74	NEO62
NEO75	NEO63
NEO76	NEO64
NEO77	NEO65
NEO78	NEO66
NEO79	NEO67
NEO80	NEO68
NEO81	NEO69
NEO82	NEO70
NEO83	NEO71
NEO84	NEO72
NEO85	NEO73
NEO86	NEO74
NEO87	NEO75
NEO88	NEO76
NEO89	NEO77
NEO90	NEO78
NEO91	NEO79
NEO92	NEO80
NEO93	NEO81
NEO94	NEO82
NEO95	NEO83
NEO96	NEO84
NEO97	NEO85
NEO98	NEO86
NEO99	NEO87
NEO100	NEO88

u.blox NEO-M8

Leave DSEL open







## **Příloha C**

### **Schéma zapojení BBCU LTE testbed**

