

Podívejte se na diskuse, statistiky a profily autorů této publikace na adrese: <https://www.researchgate.net/publication/327858790>.

Internet nanověcí: Koncepty a aplikace

Preprint - září 2018

CITACE

0

ČTENÍ

2,043

3 autoři:

**Ebtesam Almazrouei**

Khalifa University

9 PUBLIKACÍ 27 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL**Raed Shubair**

New York University Abu Dhabi

437 PUBLIKACÍ 5 169 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL**Fabrice Saffre**

Finské technické výzkumné středisko VTT

82 PUBLIKACÍ 1 515 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL

Některé z autorů této publikace pracují také na těchto souvisejících projektech:

Terahertzová komunikace: [Zobrazit projekt](#)Strojové učení pro komunikaci [Zobrazit projekt](#)

Veškerý obsah následující po této stránce nahrál [Raed Shubair](#) dne 16. července 2019.

Uživatel požádal o vylepšení staženého souboru.

ar
Xi
v:
18
09
.0
89
14
v1
[c
s.
E
T]
21
. 9.
20
18

Internet nanov ě cí:
Koncepty a aplikace

Ebtesam Almazrouei, Raed M. Shubair a Fabrice Saffre

2018

Obsah

1	Internet nano v ě cí	2
1.1	Úvod do nanosítí.....	3
1.1.1	Nanotechnologie	3
1.1.2	Komunikační paradigmatata v nanorozm ě rech.....	4
1.1.3	Vývoj nanozařzení	6
1.1.4	Charakteristika nanozařzení.....	9
1.1.5	Architektury bezdrátových nanozařzení	10
1.2	Internet nano v ě cí (IoNT)	11
1.2.1	Internet nanov ě cí.....	11
1.2.2	Architektura sít ě	14
1.2.3	Výzvy komunikace v nanorozm ě rech	17
1.3	Aplikace internetu nano v ě cí (IoNT)	22
1.3.1	Internet bio-nanotechnologií (IoBNT)	22
1.3.2	Další aplikace IoNT.....	24
	Odkazy	28

Kapitola 1

Internet nano v ě cí

Tato kapitola se zam ě řuje na internet v ě cí z pohledu nanorozm ě řů. Kapitola začíná kapitolou 1, která poskytuje úvod do nanotechnologií a nanotechnologií. Jsou zde diskutována komunikační paradigmatata v nanorozm ě rech a různé přístupy k vývoji nanozařzení. Jsou probrány vlastnosti nanozařzení a nastín ě na architektura bezdrátových nanozařzení. Oddíl 2 popisuje Internet nano v ě cí (IoNT), jeho síťovou architekturu a výzvy komunikace v nano-rozm ě rech, která je nezbytná pro umožn ě ní IoNT. Oddíl 3 uvádí n ě které praktické aplikace IoNT. Dále je diskutován internet bio-nanotechnologií (IoBNT) a příslušné biomedicínské aplikace. Jsou nastín ě ny i další aplikace, jako jsou vojenské, průmyslové a environmentální aplikace.

1.1 Úvod do nanosítí

Obecný úvod

V roce 1959 uvedl nobelovský fyzik Richard Feynman důležitou roli malých atomů a molekul pro vývoj plně funkčních pokročilých nanozařízení. Zdůraznil výzvu škálování materiálu v měřítku atomů nano. Rovněž uvedl, že výzkum v inženýrství se zaměřuje na to, jak přepracovat nebo vytvořit nanosoučástky v zařízeních v nanorozměrech. V současné době stojí současné technologie před výzvou, jak tyto nanokomponenty vyvíjet s ohledem na jejich nanorozměrové jevy [1].

Termín nanotechnologie poprvé zavedl N. Taniguchi v roce 1974 takto: "Nanotechnologie spočívá především ve zpracování, separaci, konsolidaci a deformaci materiálů jedním atomem nebo jednou molekulou." [1, 2]. V roce 1986 K. Eric Drexler spojil základní myšlenku Feynmanovy vize o nanozařízeních a přidal koncept schopnosti vytvářet tyto nanosoučástky tak, že se replikují pomocí počítačového řízení namísto miliard malých továren řízených člověkem [1, 3]. Pozornost výzkumníků vůči součástkám v nanorozměrech se však pomalu zvyšovala, až se pokrok začal projevovat až na počátku roku 2000.

1.1.1 Nanotechnologie

Mnoho lidí si mohlo splést nanovědu a nanotechnologii. Nano-technologie se rozlišuje jako použití technologie k vytvoření nových materiálů v nanorozměrném měřítku na základě poznatků z nanovědy. Nanověda je definována jako zkoumání vlastností nanomateriálů.

materiálu a jeho jevů v nano měřítku. Výzkumný zájem o poznatky v oblasti nanověd a nanotechnologií se celosvětově zvyšuje. To umožňuje využívat nové pokrokové materiály, zařízení a technologie pro práci v délce několika nanometrů [4]. Nanotechnologie je rozvíjející se technologie poskytující nové sady pro vytváření a kontrolu struktury inženýrských materiálů v rozměru nanoměřítku pro agregáty jednotlivých molekul. To umožní, aby komponenty v nanoměřítku plnily definované úkoly, jako je ukládání dat, snímání, výpočetní technika a ovládání [5]. Všechny nanosoučástky budou integrovány do jediného pokročilého nanozařízení. kde toto zařízení bude schopno distribuovaným způsobem plnit komplexní úkoly pro zdravotnictví, vojenství, biologické a nanosenzorové sítě [5-15].

1.1.2 Komunikační paradigmaty v nanorozměrech

Komunikační schopnosti nanozařízení hrají v nanotechnologiích zásadní roli. Je důležité umožnit přesnou synchronizaci mezi nanozařízeními, která pracují v kooperativním a kontrolovaném prostředí. Komunikaci v nanozařízeních lze rozdělit do dvou následujících kategorií:

- Vnitřní nanokomunikace: Komunikace mezi dvěma nebo více nanozařízeními.
- Externí nanokomunikace: Komunikace mezi nanodetektorem a externím systémem, například jiným elektronickým mikrozařízením.

V literatuře byly navrženy různé komunikační technologie pro nanozařízení, jako je elektromagnetická komunikace, molekulární komunikace a akustika [16, 17].

Elektromagnetická komunikace využívá elektromagnetické vlny, které se šíří vzduchem nebo po vedení s menšími ztrátami. Je dobře využitelná v mikroelektronických zařízeních, ale má určitá omezení při realizaci elektromagnetického spojení prostřednictvím vodičů v zařízeních v nanorozměrech. Proto by se elektromagnetická komunikace pro nanozařízení měla realizovat prostřednictvím bezdrátové komunikace. Bezdrátové spojení vyžaduje, aby byla pro nanozařízení vyvinuta anténa v nanorozměrech, a také by měl být v nanozařízení implementován radiofrekvenční transceiver, který by umožnil navázat obousměrnou elektromagnetickou bezdrátovou komunikaci [16, 17]. Integrace současného radiofrekvenčního transceiveru je však náročná kvůli složitosti a omezení velikosti v nanozařízeních. Také nedostatečný výstupní výkon nanotransveru ovlivňuje navázání obousměrného spojení mezi nanozařízeními. Elektromagnetické vlny by tedy mohly být použity k přenosu informací z mikropřístroje do nanodružice pouze v jednom směru. Proto by měla být použita jiná komunikační technologie, která by umožnila vnitřní komunikaci mezi nanozařízeními a vnější komunikaci z nanozařízení do mikrozařízení [16-23].

Akustická komunikace je založena na přenosu ultrazvukových vln. Ultrazvukové snímače jsou integrovány v nanozařízeních, která jsou schopna snímat rychlé změny tlaku přicházející z ultrazvukových vln; poté jsou vysílány akustické signály [16].

Nanomechanická komunikace umožňuje přenášet informace přes pevné spoje mezi propojenými nanozařízeními. Toto komunikační paradigma vyžaduje fyzické spojení mezi vysílačem a přijímačem v nanozařízeních. Kromě toho by požadované mechanické vysílače měly být přesně seřizeny, což je hlavní nevýhoda této komunikace.

paradigma, protože nanozařízení budou rozmístěna v nanosíti bez přímého nebo fyzického kontaktu mezi nimi. Kromě toho jsou k lokalizaci nanozařízení zapotřebí přesné navigační systémy, aby bylo možné navázat správnou nanomechanickou komunikaci [16].

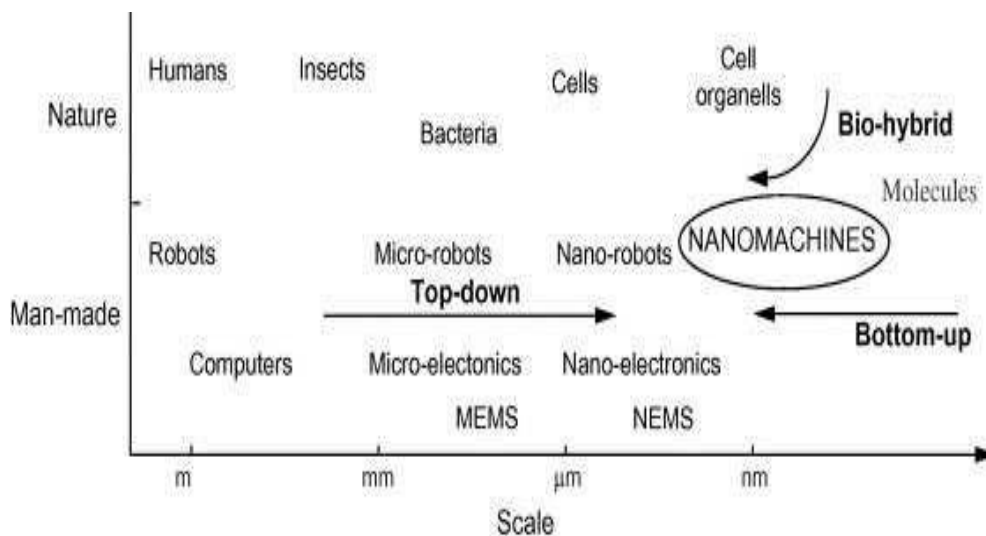
Molekulární komunikace je nová a slibná technologie, která umožňuje přenos a příjem dat v molekulách [16, 24-35]. Díky přirozenému prostředí a velikosti molekul je možné molekulární vysílače integrovat do nanozařízení. Nanopřenašeče jsou schopny uvolňovat některé molekuly, reagovat na jiné, a reagovat na interní příkazy mezi molekulami v nanosíti.

1.1.3 Vývoj nanozařízení

Nanosenzorické zařízení je definováno jako zařízení navržené z nanokomponentů, které je schopno pracovat v nanoměřítku a je schopno stanovit požadovanou úlohu, jako je komunikace, snímání, výpočet, ukládání dat a ovládání. Tyto úlohy provádějí nanokomponenty a složitost vyvinutého nanozařízení závisí na úrovni požadované úlohy. K vývoji nanozařízení se používají různé přístupy: 1) přístup shora dolů, přístup zdola nahoru a biohybridní přístup, jak je znázorněno na obrázku 1.1.

Přístup shora dolů

V rámci přístupu shora dolů se nanozařízení vyvíjejí na základě snížení úrovně současných mikroelektronických a mikroelektromechanických technologií. K vývoji nanozařízení se používají pokročilé výrobní procesy, jako je elektronová výroba.



Obrázek 1.1: Přístupy k nanozařizním [16].

paprsková litografie [36-38] a mikrokontaktní tisk [39]. Architektura nanozařizní je stejná jako architektura mikroelektronických zařizní a mikroelektromechanických systémů (MEMS). Nicméně přístup k nanoelektromechanickým systémům [40-42]. Pro výrobu a montáž těchto nanozařizní podle tohoto přístupu je navržena metoda výroby jednoduchých mechanických struktur, jako jsou nanoelektrické převody, která je však zatím v počátečním stadiu [43, 44].

Přístup zdola nahoru

Při přístupu zdola nahoru se k vývoji nanozařizní používají stavební bloky, jako jsou jednotlivé molekuly. Teoreticky byla navržena nanozařizní, jako jsou molekulární diferenciální převody a čerpadla [51], založená na diskretním počtu molekul [45]. Tento přístup je založen na molekulárních výrobních technologiích, kdy jsou nanozařizní sestavována molekulu po molekule. Tento

technologie zatím není k dispozici [16,46,47]. V současné době se k vývoji nanozařízení používají různé metody založené na přístupu zdola nahoru, který vychází ze samoskladných molekulárních vlastností [48], jako jsou molekulární spínače [49] a molekulární raketoplány [50].

Biohybridní přístup

Biohybridní přístup navrhl využití stávajících biologických nanozařízení, jako jsou molekulární motory, jako stavebních bloků nebo modelů pro vývoj nových nanozařízení [51]. Většina biologických živých organismů existuje v buňkách, jak je znázorněno na obrázku 1.1. Očekává se, že vlastnosti biologické struktury živé buňky, jako jsou nano-biosenzory, nanoaktuátory, komponenty pro ukládání biologických dat, nástroje a řídicí jednotky, vytvoří novou základní linii člověkem vytvořeného nanozařízení [16, 52].

Některé biologické nanozařízení je vzájemně propojeno a tvoří nanosíť. Technika komunikace mezi buňkami umožňuje spolupráci více buněk při provádění složitých úkolů, jako je dělení buněk, řízení hormonálních aktivit nebo reakce imunitního systému u člověka. Fungování této biologické nanosítě je založeno na molekulární signalizaci.

Optimalizovaná architektura, spotřeba energie a komunikační paradigma stávajících biologických nanozařízení motivuje k vývoji budoucích nanozařízení s využitím přístupu biohybridů.

1.1.4 Charakteristika nanozařízení

Vývoj budoucích nanozařízení závisí na pokročilé technologii, která je schopna navrhnout budoucí nanozařízení, jež budou k dispozici v blízké budoucnosti. Hlavní charakteristiky budoucích nanozařízení jsou podrobně popsány níže [16]:

- Samostatné nanozařízení: Každý nanozařízení má kód nebo sadu instrukcí pro realizaci zamýšleného úkolu. Kód nebo soubor instrukcí může být zabudován do molekulární struktury nanozařízení nebo jej nanozařízení může číst ze sousední molekulární struktury.
- Samočinná montáž nanozařízení: Vlastnost samosestavování se přirozeně nachází v molekulární příbuznosti mezi dvěma různými prvky na nanoúrovni. Tento proces umožní nanozařízení autonomní interakci s vnějšími molekulami.
- Samoreplikace: Tato vlastnost by měla být součástí nanopřístroje, aby se nanopřístroj mohl kopírovat pomocí externích prvků. Znamená to, že nanozařízení má soubor instrukcí k vytvoření kopie sebe sama. Tato vlastnost usnadní možnost realizovat makroskopické úlohy vytvářením velkého počtu nanozařízení levným způsobem [53].
- Nanozařízení-komunikace: Komunikace mezi nanozařízeními je klíčová, aby nanozařízení mohla vzájemně spolupracovat a plnit nebo realizovat složitější úkoly.

- Pohyb: Nanozařízení se pohybuje z jednoho místa na druhé pomocí časoprostorové aktivace. Lokomoce pomůže nanozařízením provádět specifické úkoly tím, že určí polohu nanozařízení tak, aby se nacházelo na správném místě a ve správný čas pro provedení zamýšleného úkolu. Jednotlivé nanozařízení se však nemůže pohybovat směrem k předem určenému cíli. Vestavené nanosenzory a nanoprocesory by mohly být použity v komplexním systému k detekci a sledování polohy cíle. Tyto vlastnosti optimalizují využití nanorobotů pro léčbu nemocí ve zdravotnictví [54, 55].

Očekává se, že další pokrok v oblasti nanosenzorů a nanoaktorů umožní integraci molekulárních vysílačů do nanostrojů.

1.1.5 Architektury bezdrátových nanozařízení

Bezdrátové nanozařízení se může skládat z jedné nebo více součástí podle úrovně složitosti potřebné k provedení zamýšleného úkolu. Architektura nanozařízení, ať už se jedná o nanorobota nebo jednoduché molekulární přepínače, je následující [16, 54]:

1. Řídicí jednotka: Řídicí jednotka: Provádí pokyny k provedení požadovaných úkolů prostřednictvím řízení všech ostatních součástí nanozařízení. Informace o nanozařízení mohou být uloženy v paměťové jednotce uvnitř řídicí jednotky.
2. Komunikační jednotka: Umožňuje vysílání a příjem masáže na zařízení v nanorozměrech, např. molekul, prostřednictvím nanopřijímačů.

3. Reprodukční jednotka: Využívá externí prvky k výrobě každé součásti nanozařízení a sestavuje všechny součásti k replikaci nanozařízení. Všechny pokyny k provedení tohoto úkolu jsou nainstalovány v jednotce.
4. Napájecí jednotka: Poskytuje energii všem součástem nanozařízení, získává energii z vnějších zdrojů, např. z teploty a světla. energii ukládá pro budoucí potřeby distribuce a spotřeby.
5. Senzory a akční členy : Hrají roli rozhraní mezi nanozařízením a prostředím a nanostrojem. Do konstrukce nanozařízení lze zahrnout různé typy senzorů nebo aktuátorů, jako jsou chemické senzory, teplotní senzory, čerpadla, svorky, motory nebo lokomoční mechanismy.

1.2 Internet nano věcí (IoNT)

1.2.1 Internet nanověcí

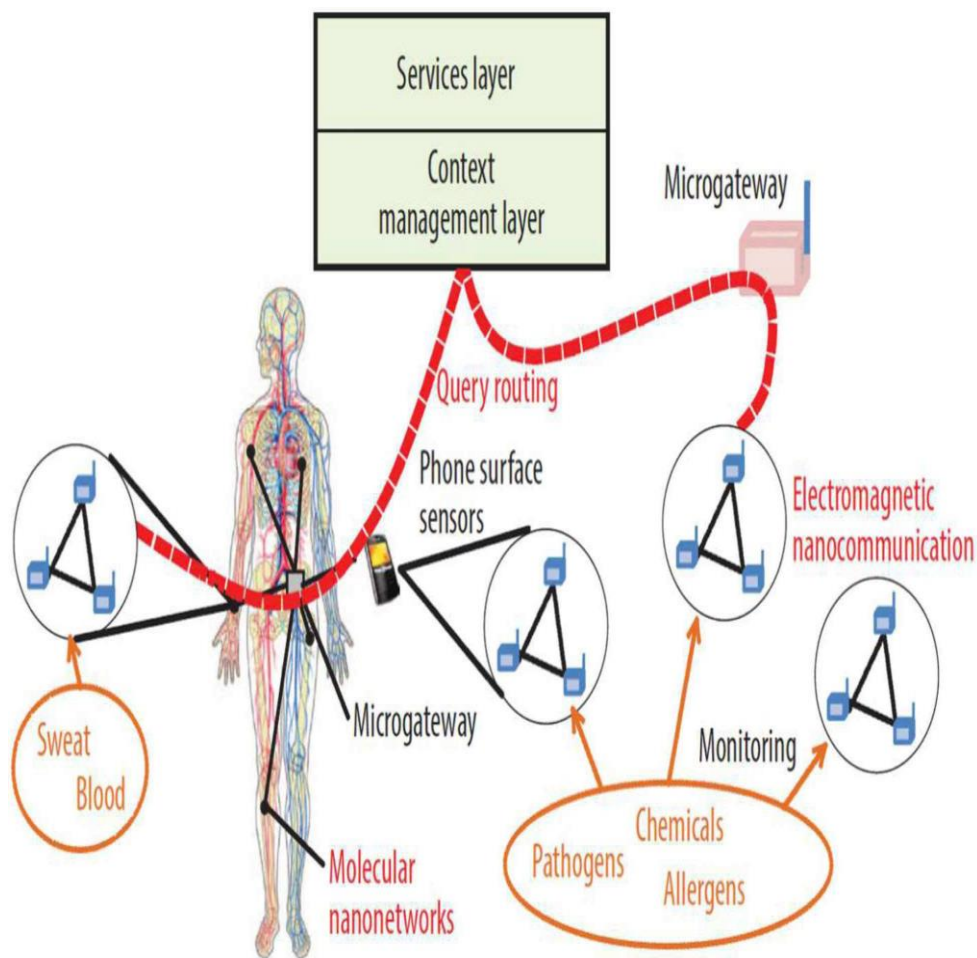
Internet věcí (IoT) se v posledním desetiletí těší velkému zájmu výzkumníků. Cílem je rozšířit internet na mnoho zařízení a objektů z různých oblastí propojením těchto objektů a zařízení s vestavěnými výpočetními schopnostmi [56]. Slovo "věci" zahrnuje všechny fyzické objekty na planetě, nejen komunikační zařízení, která mají být připojena k internetu a řízena prostřednictvím bezdrátových sítí [57]. Zařízení IOT se budou propojovat prostřednictvím různých typů bezdrátových sítí krátkého dosahu.

technologie, jako jsou WiFi, radiofrekvenční identifikace (RFID), ZigBee a senzorové sítě [58, 59].

Koncept internetu věcí přitahuje mnoho výzkumníků po celém světě. Zahnuje mnoho oblastí, jako jsou sítě v oblasti tele, domácí sítě, sítě bezpilotních letadel (UAV), komunikace mezi zařízeními (D2D) a satelitní sítě. Očekává se, že v blízké budoucnosti budou integrovány různé síťové protokoly, aplikace a síťové domény, aby vyhovovaly technologiím internetu věcí [57]. Očekává se, že do sítí a zařízení propojených s IOT budou přidány bezpečnostní funkce a protokoly pro správu [59].

V internetu věcí jsou propojeny všechny typy reálných fyzických prvků, jako jsou akční členy a senzory, osobní nebo domácí elektronická zařízení, což umožňuje novou éru bezproblémového připojení pro různé aplikace, jako je komunikace mezi stroji (device to device), monitorování v reálném čase pro zdravotní péči a průmyslové prostředí, komunikace a doprava mezi vozidly, inteligentní sítě a infrastruktury pro zavedení inteligentního řízení energie, řízení infrastruktury, monitorování životního prostředí, inteligentní monitorování zdraví, inteligentní doprava ve velké síti [56]. Toho je dosaženo začleněním nanozařízení, která mají být propojena pomocí nanosítí. Obrázek 1.2 znázorňuje koncepci nanosítí v aplikaci zdravotní péče.

Implementace nanozařízení usnadňuje snímání a sběr dat z míst v těle, která dříve nebylo možné snímat kvůli velikosti snímače. Nová lékařská diagnostika a objevy tak posunou současnou lékařskou technologii kupředu [60]. Akyildiz a kol. definují tuto technologii jako Internet of Nano Thing (IoNT) [61].



Obrázek 1.2: Internet nano v ě cí [60].

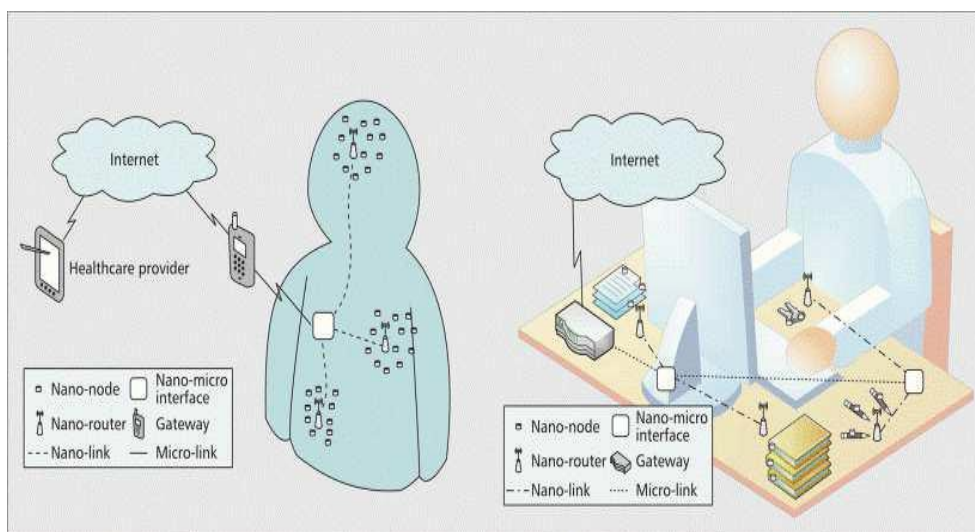
Koncept IoNT je představen jako typ internetu v ě cí, kde jsou nanodrátky o rozm ě rech od 1 do 100 nm propojeny s klasickými sít ě mi, což vede k novým sít'ovým paradigmatům. Pro technologii IoNT se navrhuje využití nanoantén na bázi grafenu, které pracují v terahertzovém frekvenčním pásmu [61]. Problém extrémního útlumu tetrahertzových frekvencí v zař ízeních v nanorozm ě rech nastínil [61]. IoNT čelí výzvám, jak propojit současné sít ě mikrozař ízení s novými.

schéma nanozařízení. Proto by měl být proveden rozsáhlý výzkum zaměřený na řešení komunikačních a síťových problémů v elektromagnetickém poli, modelování kanálů a požadované síťové protokoly pro provoz v IoNT pro různé průmyslové, biomedicínské a průmyslové aplikace.

1.2.2 Architektura sítě

Práce Akyildize a kol. se zaměřuje na elektromagnetickou komunikaci pro síť IoNT [61] ve vnitrotělových nanosítích pro vzdálenou zdravotní péči a propojenou kancelář. Architektura sítě zobrazená na obrázku 1.3 se skládá z nanouzlů, nanorouterů, nanostrojů, jako jsou nanosenzory a nanoaktuátory, které jsou rozmístěny v lidském těle, aby poskytovaly vyšetřujícímu nebo poskytovateli zdravotní péče možnost vzdáleného přístupu k nanozařízením a jejich ovládání prostřednictvím zařízení s nanomikro rozhraním [6]. Akyildiz a kol. navíc ukazuje architekturu propojené kanceláře, kde je každý jednotlivý prvek, který se v kanceláři nachází, vybaven nanopřenosným zařízením, aby mohl zůstat trvale připojen k internetu. Proto je možné bez námahy sledovat polohu a stav všech prvků v kanceláři. Aby však nanozařízení mohla sbírat mechanickou a elektromagnetickou energii z okolí a zachovat si funkci s vysokým výkonem, je zapotřebí velmi nízká spotřeba energie a přiměřené výpočetní schopnosti [6, 62].

Každá nanosíť má však v síťové architektuře internetu nanověcí základní komponenty, které jsou uvedeny níže [61]:



Obrázek 1.3: Síťová architektura pro internet nano-v ě cí [61].

Nano uzly

Nanonody jsou nejmenší a nejjednodušší nanostroje v architektuře nanosítě. Vzhledem k jejich omezené paměti jsou jim přidělovány jednoduché výpočetní úlohy. Omezeny jsou jejich komunikační schopnosti a spotřeba energie, proto jsou schopny vysílat na krátké vzdálenosti. Nanonásobiče by mohly být implementovány do všech typů věcí, jako jsou knihy, klíče, papírové složky nebo uvnitř lidského těla jako biologické nanosenzorové uzly.

Nano směrovače

Nanoroutery jsou schopny agregovat informace přicházející z omezených nanostrojů. Slouží k řízení chování nanorozcestníků pomocí jednoduchých řídicích příkazů, jako je zapnutí/vypnutí, čtení hodnoty, usnutí atd.). Nanoroutery mají větší výpočetní zdroje než nanonapáječe.

ody, nicméně nárůst schopností vede k nárůstu jejich velikosti, což ovlivňuje jejich nasazení v nanopracovištích.

Zařízení s nano-mikro rozhraním

Zařízení rozhraní nano-mikro jsou implementována tak, aby umožňovala příjem/odesílání informací přicházejících z nanorouterů do zařízení nebo systému v mikroměřítku a naopak. Zařízení nano-mikro rozhraní by mohla být hybridními zařízeními schopnými komunikovat v nanorozměrech s využitím klasických komunikačních paradigmat v běžných komunikačních sítích a nových komunikačních paradigmat pro síťě nanozařízení.

Brána

Brána usnadňuje vzdálené připojení celého systému přes internet. Například ve scénáři vnitřní sítě v oboru zdravotnictví může pokročilý mobilní telefon předávat přijaté informace ze zařízení s nano-mikro rozhraním koncovému uživateli (v tomto příkladu poskytovateli zdravotní péče). V propojené kanceláři se k vytvoření této funkce využívá modem-směrováč. přijímá z nano-mikrorozhraní v našem zápisu k našemu poskytovateli zdravotní péče. V propojené kanceláři může tuto funkci zajistit modem-směrováč. Navzdory tomu, že propojení mikrozařízení, vývoj bran a správa sítě přes internet jsou stále otevřenými oblastmi výzkumu, ve zbývající části tohoto článku se zaměříme především na problémy komunikace mezi nanostroji.

Práce Balasubramaniam a kol. se navíc zaměřuje na bezdrátové síťě v oblasti těla vytvořené pomocí nanozařízení [2]. Síťě v oblasti těla kol-

lektorovat důležité informace o pacientech a předávat je do výpočetních systémů poskytovatelů služeb. K tomu dosahuje vyšší přesnosti a efektivity při sledování zdravotního stavu velkého počtu pacientů. Senzory zabudované do prostředí mohou navíc pasivně pomáhat v každodenním životě starších a zdravotně postižených lidí. S rozvojem malých zařízení a jejich komunikační výkonnosti se očekává, že takové sítě v malém prostoru budou v budoucnu také potřeba.

1.2.3 Výzvy komunikace v nanorozměrech

Internet nano-velečí vyžaduje přepracování a vývoj nových komunikačních paradigmat a síťových konceptů, které budou kompatibilní s nano-rozměry strojů. Mnoho komunikačních výzev se objevuje ve fyzikální vrstvě nanostrojů k nanosíťovým protokolům. Tento oddíl upozorňuje na hlavní výzvy z oblasti příslušné komunikace, jak je uvedeno v [61].

Frekvenční pásmo činnosti elektromagnetických nanopřijímačů

Komunikační příležitosti a výzvy u zařízení v nanorozměrech jsou silně spojeny s pracovním frekvenčním pásmem nanopřenosu, zejména s nanoanténami. Předpokládá se, že tyto antény budou v budoucnu vyráběny s využitím novějších materiálů, jako je grafen, pro nanokomunikační sítě [61, 63, 64]. Rychlost šíření vln v grafenové nanoanténě je v měřítku stokrát nižší než rychlost světla ve vakuu. Kromě toho může být rezonanční frekvence nanoantény postavené z grafenu až

až o dva řády nižší než u nanoantén na bázi neuhlíkových materiálů.

Lin a kol. zejména zjistili, že 1 μm dlouhá nanoanténa na bázi grafenu postavená buď z grafenových nanopásků (GNR), nebo z uhlíkových nanotrubic (CNT) účinně vyzařuje v terahertzovém pásmu, což splňuje předpoklady pro frekvenční pásmo VF tranzistorů na bázi grafenu [65]. V [66] bylo prokázáno, že jediná uhlíková nanotrubička, která mechanicky rezonuje na vlnové frekvenci, je schopna přijímat a demodulovat elektromagnetickou vlnu. Tato jediná CNT anténa byla navržena tak, že jeden konec byl připojen ke zdroji velmi vysokého napětí a druhý konec byl ponechán jako plovoucí. Když je nanotrubička ozářena elektromagnetickou vlnou, elektrony na volném konci vibrují. Vznikne tedy frekvence iniciovaná EM vlnou, a pokud odpovídá vlastní rezonanční frekvenci antény CNT, stanou se tyto vibrace významnými a umožní jednoduché anténě CNT přijímat a demodulovat signál.

EM vlny generované nanomechanickým přijímačem na bázi CNT mohou pracovat v rozměrech nad několik mikrometrů. Předpokládá se však, že energetická účinnost generování EM vln v nanoanténách vyzařovaných v terahertzovém pásmu je velmi nízká [67]. K mechanickému buzení antény CNT je také zapotřebí vysoký zdroj energie, který je pro generování budoucích EM nanosítí pracujících v terahertzovém pásmu neúčinný. Nicméně nanomechanický přijímač na bázi CNT může být použit v nanosítích k řízení nanozařízení z makro- a mikroměřítky v zařízeních s nano-mikro rozhraním. Jako příklad lze uvést konvenční vysílač AM/FM, který lze použít k aktivaci/deaktivaci tisíců nanozařízení současně.

Dálkové infračervené pásmo a pásmo mikrovln, které se nachází nad, resp. pod terahertzovým pásmem, byly podrobně zkoumány. Terahertzové pásmo je jednou z nejméně prozkoumaných frekvenčních oblastí v EM spektru. Proto by měly být pro elektromagnetické nanosítě vyvinuty nové modely kanálů pro terahertzové pásmo.

Modelování kanálů

Terahertzové pásmo zahrnuje frekvence mezi 100 GHz a 10 THz a je stále nelicencovaným pásmem. Má zásadní omezení pro komunikaci na krátkou a střední vzdálenost [68,69], ale je použitelné pro nanosíťové aplikace, jak bylo uvedeno výše, proto by se mělo zkoumat modelování kanálů pro toto pásmo na velmi krátké vzdálenosti. Jornet et al. zkoumá vlastnosti terahertzového pásma z hlediska ztrát na cestě, šumu, šířky pásma a kapacity kanálu, jak je popsáno níže [69].

- Ztráta cesty

Celková ztráta dráhy $L(f_w, l_{path})$ pro šířící se vlnu v terahertzovém pásmu je definována jako součet ztráty šířením L_{spread} a molekulární absorpční ztráty $L_{absorption}$.

$$L(f_w, l_{path}) = L_{spread}(f_w, l_{path}) + L_{absorption}(f_w, l_{path}) \quad (1.1)$$

kde f_w je frekvence vlny v terahertzovém pásmu a l_{path} je celková délka dráhy vlny.

Ztráta šíření je výsledkem útlumu, který vzniká v důsledku expansionace frekvenční vlny f_w při jejím šíření prostředím.

l_{path} .

$$L_{spread}(f_w, \frac{l_{pat}}{h}) = \left(\frac{4 \pi f_w l_{path}}{c} \right)^2 \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu.

Absorpční ztráta $L_{absorbce}$ je výsledkem útlumu, ke kterému dochází v důsledku molekulární absorpce, která ovlivňuje šíření vlny. Energie vlny se mění na kinetickou energii excitovaných molekul elektromagnetickým zářením na určitých frekvencích v terahertzovém pásmu, kde se část záření mění na vnitřní vibrace. Tím se energie vlny snižuje, což vede k absorpční ztrátě $L_{absorbtion}$ a je definována takto:

$$L_{absorbtion}(f_w, \frac{l_{pat}}{h}) = \frac{1}{k(f)l} \quad (1.3)$$

nová cesta

kde k je koeficient absorpce média.

Absorpční ztráty závisí na typu molekul a jejich koncentraci podél cesty. Různé rezonanční frekvence jsou spojeny s různými typy molekul, kde se absorpce při každé rezonanci rozprostírá v rozsahu frekvencí. V důsledku toho bude terahertzový kanál trpět vysokou frekvenční selektivitou, vícecestnou propastí a rozptylem od nanočástic v poli, které ovlivňují sílu signálu v přijímači.

- Hluk

Hlavním zdrojem okolního šumu v terahertzovém pásmu je.

molekulární šum. Molekulární absorpce vnáší šum spolu s útlumem. Tento typ šumu se vyskytuje pouze při přenosu signálu kanálem. Kromě toho se v okolí frekvencí, kde je molekulární absorpce považována za vysokou, zavádí ekvivalentní teplota šumu. Celkový šumový výkon na přijímači se vypočítá takto:

$$P_{noise}(f_w, l_{path}) = k_B B (T_{molecular}(f_w, l_{path}) + T_{else}(f_w)) \quad (1.4)$$

kde k_B označuje Boltzmannovu konstantu, B je šířka pásma přenosu systému, $T_{molecular}$ je teplota molekulárního šumu a T_{else} znamená jiný zdroj šumu přítomný v prostředí, např. elektronický šum přijímače.

Celkový šumový výkon P_{noise} má ve spektru několik šumových vrcholů v důsledku různých rezonančních frekvencí spojených s jednotlivými typy molekul [69].

- Šířka pásma a kapacita kanálu

Molekulární absorpce určuje šířku přenosového pásma v terahertzovém kanálu. Proto molekulární složení média a celková přenosová cesta omezují dostupnou šířku pásma. Dostupná šířka pásma pro velmi krátký dosah se pohybuje od několika stovek gigahertzů až po téměř deset terahertzů (téměř celé pásmo).

Proto se předpokládá, že kapacita kanálů elektromagnetických nanosítí v terahertzovém pásmu bude řádově několik terabitů.

za sekundu. Kapacita přenášených informací je však omezená kvůli omezeným možnostem nanostrojů nebo nanozařízení, které tuto velkou šířku pásma nevyužívají. Navzdory tomuto omezení by dostupná šířka pásma mohla otevřít nový výzkum pro nové techniky modulace informací a schémata sdílení kanálů, speciálně navržená pro nanozařízení v nanosítích pracujících v terahertzovém pásmu.

1.3 Aplikace internetu nano v ě cí (IoNT)

1.3.1 Internet bio-nanotechnologií (IoBNT)

Nový výzkum zam ě řený na implementaci nanozařízení a nanotechnologií v biologické oblasti. Roste zájem o spojení nástrojů syntetické biologie v rámci nanotechnologie, aby bylo možné ovládat, modifikovat, obnovovat a znovu používat biologické buňky [56,70]. Biologická buňka, která se využívá ve vestav ě n ě m výpočetním zařízení IoT, se nazývá Bio-NanoThing (BNT), kde lze efektivn ě ovládat, znovu používat a přetvářet funkce biologických bun ě k, jako je snímání, ovládání, zpracování a komunikace. Tato koncepce zavedla Internet Bio-NanoThing (IoBNT), kde jsou buňky založeny na biologických molekulách namísto elektroniky.

Biomedicínské aplikace

IoBNT umožňuje kompatibilitu a stabilitu na biomolekulární úrovni. To poskytuje možnost použít IoBNT k interakci s orgány a tkáněmi. V této části jsou zmíněny aplikace IoBNT [16].

- Podpora imunitního systému

IoBNT lze využít k podpoře imunitního systému při identifikaci a kontrole cizorodých a patogenních prvků v lidském těle. Několik nanozařízení, jako jsou senzory a aktuátory, vzájemně spolupracuje v makro-, mikro- a nanosystémech, aby chránily organismus před nemocemi. Implementace nanozařízení může pokračovat v oblasti medicíny tím, že využije tato nanozařízení k předvídání, detekci a eliminaci určitých postupů na základě lokalizace škodlivých činitelů a buněk, jako jsou rakovinné buňky [71, 72]. Tím se minimalizuje riziko vzniku takového onemocnění a zajistí se méně agresivní a invazivní léčba v porovnání s tou stávající.

- Bio-hybridní implantáty Nanonetowrks v IOBNT podpoří optické umístění orgánů, nervových drah nebo ztracených tkání v lidském těle [46, 73]. Mezi biohybridními implantáty a prostředím lze zajistit přátelská rozhraní, která umožní obnovu drah centrálního nervového systému.

- Systémy pro podávání léků Nanozařízení v IoBNT mohou být použity jako regulovatelné implantáty, které by mohly kompenzovat metabolická onemocnění, jako jsou diabetu. Chytré zásobníky glukózy a nanosenzory spolupracují na podpoře

hladinu glukózy [74, 75]. Účinky neurodegenerativních onemocnění lze eliminovat pomocí systému pro doručování léků, který do neurosystému dopravuje neurotransmitery nebo specifické léky [76].

- Monitorování zdravotního stavu Implementace sítí nanosenzorů do lidského těla může být přínosem pro medicínu, protože umožňuje monitorování zdravotního stavu, sledování a kontrolu hladiny kyslíku, cholesterolu a hormonálních poruch a poskytuje včasnou diagnostiku zdravotního stavu [73, 77]. Mezi nositeli a subjekty, které mohou přistupovat k přenášeným zdravotním informacím, by měla být zachována dobrá úroveň propojení.
- Genetické inženýrství Použití nositelů v IoNBT umožní potenciální rozšíření aplikací genetického inženýrství. Nanozařízení umožní modifikaci, reinženýrství a manipulaci s nano- strukturami uvnitř genů a molekulárních sekvencí [16].

1.3.2 Další aplikace IoNT

Průmyslové aplikace

Nanonetwork se bude používat v průmyslových aplikacích a aplikacích pro spotřební zboží. Přinese pokrok ve výrobních procesech, vývoji nových materiálů a postupech kontroly kvality. Konkrétně tyto aplikace již navrhl [56]:

- Kontrola kvality potravin a vody Nanosítě by mohly být použity k monitorování a kontrole kvality potravin a tekutin. Nanosenzory budou schopny detekovat toxické složky a malé bakterie, které se nacházejí v potravinách a tekutinách.

vody, které nelze zjistit pomocí tradičních snímacích technologií [78]. Tyto pokročilé samonosné nanosenzorové sítě budou schopny detekovat i nepatrné množství závad, jako jsou chemické nebo biologické látky instalované ve vodních zdrojích [56].

- Funkcionalizované materiály a tkaniny Pomocí nanosítí lze vyrábět nové pokročilé materiály a tkaniny, které umožňují prokázat určité funkční vlastnosti. Existují vyvinuté výrobky, jako jsou antimikrobiální a skvrny odpuzující textilie, které využívají nanofunkcionalizované materiály [79, 80]. Nanoaktuátory komunikují s nanosenzory za účelem řízení reakce, která zlepší proudění vzduchu v pokročilé inteligentní tkanině.

Vojenské aplikace

Nanotechnologie mohou zdůraznit a posunout několik aplikací pro vojenskou oblast. Rozsah nanosítí je krátký, proto se rozsah nanosítí specifikuje na základě požadované aplikace. Rozsah nanosítí pro aplikace monitorování výkonu vojáků je malý v dosahu lidského těla, zatímco pro monitorování a ovládání na bojišti je zapotřebí hustá velká síť. Níže jsou uvedeny některé z vojenských aplikací:

- Jaderná, biologická a chemická (NBC) obrana

Pro detekci agresivních chemických a biologických látek na velkém území nad bojištěm nebo v cílových oblastech se nasazuje hustá síť složená z nanosenzorů a nanoaktuátorů. Kromě toho koordinuje obranné reakce oblastí bojiště [16, 81]. Síť nanosenzorů

lze použít k detekci neoprávněného vstupu biologických, chemických a radiologických materiálů instalovaných v nákladních kontejnerech.

- Nano-funkcionalizované vybavení Nanovlákná mohou zdokonalit maskování a armádní uniformy pomocí nových pokročilých vojenských zařízení, než je výroba pokročilých materiálů vybavených nanosítěmi. Tato technologie umožní samoregulaci tělesné teploty vojáků pod oblečením a bude schopna detekovat a informovat, zda byl voják zraněn [82].

Environmentální aplikace

Nanočástice mají různé aplikace v oblasti životního prostředí, které podpoří současné technologie. Některé aplikace v oblasti životního prostředí jsou uvedeny níže [16]:

- Biodegradace Narůstající problém nakládání s odpady po celém světě by mohl zvládnout proces biodegradace na skládkách pomocí nanosítí. Nanosítě lze použít ke snímání a označování různých materiálů, poté se inteligentní nanoaktuátory využijí k lokalizaci a zpracování biodegradace těchto materiálů.
- Zvířata a kontrola biodiverzity Některé druhy zvířat lze v přírodním prostředí kontrolovat pomocí nanosítí. Nanosítě by mohly vyvíjet feromony nebo zprávy, které by spouštěly určité chování zvířat. Proto by bylo možné kontrolovat umístění určitých druhů zvířat v určitém prostředí.

- Kontrola znečištění ovzduší Kvalitu ovzduší lze řídit a kontrolovat pomocí nanosítí. Budou vyvinuty pokročilé nanofiltry, které budou odstraňovat škodlivé látky nebo chemikálie v ovzduší, což zlepší jeho kvalitu [83]. Rovněž nanofiltry lze využít pro ~~och~~ření vody [84].

Odkazy

- [1] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet a M. Pierobon, "Nanonetworks: A new frontier in communications," *Communications of the ACM*, roč. 54, č. 11, s. 84-89, 2011.
- [2] N. Taniguchi, "On the basic concept of nano-technology proceedings of the international conference on production engineering tokyo part ii japan society of precision engineering," 1974.
- [3] K. DREXLER, "Molekulární inženýrství - assembly a budoucí kosmický hardware", *Letecké století XXI: Space sciences, applications, and commercial developments*, s. 1327-1332, 1987.
- [4] B. Roszek, W. De Jong a R. Geertsma, "Nanotechnology in medical applications: state-of-the-art in materials and devices", 2005.
- [5] I. F. Akyildiz a J. M. Jornet, "Optoelektronika a komunikace nanoměřičů širokopásmové terahertzové komunikace."
- [6] --, "Electromagnetic wireless nanosensor networks", *Nano Communication Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 3-19, 2010.

- [7] R. M. Shubair, "Robust adaptive beamforming using LMS algorithm with SMI initialization," in *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4A, Jul. 2005, pp. 2-5 vol. 4A.
- [8] R. M. Shubair a W. Jessmi, "Performance analysis of SMI adaptive beamforming arrays for smart antenna systems," in *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1B, 2005, pp. 311-314 vol. 1B.
- [9] F. A. Belhouli, R. M. Shubair a M. E. Ai-Mualla, "Modelování a výkonnostní analýza odhadu DOA v adaptivních polích pro zpracování signálu," in *10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2003. ICECS 2003. Proceedings of the 2003*, svazek 1, prosinec 2003, s. 340-343. Svazek 1.
- [10] R. M. Shubair a A. Al-Merri, "Robustní algoritmy pro vyhledávání směru a adaptivní formování paprsku: výkon a optimalizace", in *The 2004 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2004. MWS-CAS '04*, svazek 2, červenec 2004, s. II-589-II-592, svazek 2.
- [11] E. Al-Ardi, R. Shubair a M. Al-Mualla, "Direction of arrival estimation in a multipath environment: An overview and a new contribution," in *ACES*, vol. 21, 2006.
- [12] G. Nwalozie, V. Okorogu, S. Maduadichie a A. Adenola, "A simple comparative evaluation of adaptive beam forming algorithms," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, no. 7, 2013.

- [13] M. A. Al-Nuaimi, R. M. Shubair a K. O. Al-Midfa, "Direction of arrival estimation in wireless mobile communications using minimum variance distortionless response," in *Second International Conference on Innovations in Information Technology (IIT'05)*, 2005, s. 1-5.
- [14] M. Bakhar a D. P. Hunagund, "Eigen structure based direction of arrival estimation algorithms for smart antenna systems," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 9, no. 11, pp. 96-100, 2009.
- [15] L. Mohjazi, M. Al-Qutayri, H. Barada, K. Poon a R. Shubair, "Deployment challenges of femtocells in future indoor wireless networks", in *GCC Conference and Exhibition (GCC), 2011 IEEE*. IEEE, 2011, s. 405-408.
- [16] I. F. Akyildiz, F. Brunetti a C. Blázquez, "Nanonetworks: A new communication paradigm," *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2260-2279, 2008.
- [17] R. A. Freitas, *Nanomedicina, dí I: základní možnosti*. Landes Bioscience Georgetown, TX, 1999.
- [18] M. S. Khan, A. D. Capobianco, S. M. Asif, D. E. Anagnostou, R. M. Shubair a B. D. Braaten, "A Compact CSRR-Enabled UWB Diversity Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, str. 808-812, 2017.

- [19] R. M. Shubair a Y. L. Chow, "A closed-form solution of vertical dipole antennas above a dielectric half-space," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 12, pp. 1737-1741, Dec. 1993.
- [20] A. Omar a R. Shubair, "UWB coplanar waveguide-fed-coplanar strips spiral antenna," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Apr. 2016, pp. 1-2.
- [21] M. AlHajri, A. Goian, M. Darweesh, R. AlMemari, R. Shubair, L. Weru-aga a A. AlTunaiji, "Accurate and robust localization techniques for wireless sensor networks", červen 2018, arXiv:1806.05765 [eess. SP].
- [22] J. Samhan, R. Shubair a M. Al-Qutayri, "Design and implementation of an adaptive smart antenna system", in *Innovations in Information Technology, 2006*, 2006, s. 1-4.
- [23] M. AlHajri, A. Goian, M. Darweesh, R. AlMemari, R. Shubair, L. Weru-aga a A. Kulaib, "Hybrid rss-doa technique for enhanced wsn localization in a correlated environment," in *Information and Communication Technology Research (ICTRC), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 238-241.
- [24] R. M. Shubair a H. Elayan, "In vivo wireless body communications: *Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2015 Loughborough*. IEEE, 2015, s. 1-5.
- [25] H. Elayan, R. M. Shubair, J. M. Jornet a P. Johari, "Terahertz channel model and link budget analysis for intrabody nanoscale communica-

- tion," *IEEE transactions on nanobioscience*, vol. 16, no. 6, pp. 491-503, 2017.
- [26] H. Elayan, R. M. Shubair a A. Kiourti, "Wireless sensors for medical applications: Současný stav a budoucí výzvy," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 2017 11th European Conference on*. IEEE, 2017, s. 2478-2482.
- [27] H. Elayan a R. M. Shubair, "On channel characterization in human body communication for medical monitoring systems," in *Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), 2016 17th International Symposium on*. IEEE, 2016, s. 1-2.
- [28] H. Elayan, R. M. Shubair, A. Alomainy a K. Yang, "In-vivo terahertz channel characterization for nano-communications in wban," in *Antennas and Propagation (APSURSI), 2016 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2016, s. 979-980.
- [29] H. Elayan, R. M. Shubair a J. M. Jornet, "Bio-electromagnetic thz propagation modeling for in-vivo wireless nanosensor networks," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 2017 11th European Conference on*. IEEE, 2017, s. 426-430.
- [30] M. J. Moore, A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kaya-suga, H. Kojima, H. Sakakibara a K. Oiwa, "A design of a molecular communication system for nanomachines using molecular motors." in *PerCom Workshops*, 2006, s. 554-559.

- [31] H. Elayan, C. Stefanini, R. M. Shubair a J. M. Jornet, "End-to-end noise model for intra-body terahertz nanoscale communication", *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2018.
- [32] H. Elayan, P. Johari, R. M. Shubair a J. M. Jornet, "Photothermal modeling and analysis of intrabody terahertz nanoscale communication," *IEEE transactions on nanobioscience*, vol. 16, no. 8, pp. 755-763, 2017.
- [33] H. Elayan, R. M. Shubair, J. M. Jornet a R. Mitra, "Multi-layer intrabody terahertz wave propagation model for nanobiosensing applications", *Nano Communication Networks*, vol. 14, pp. 9-15, 2017.
- [34] H. Elayan, R. M. Shubair a N. Almoosa, "In vivo communication in wireless body area networks," in *Information Innovation Technology in Smart Cities*. Springer, 2018, s. 273-287.
- [35] M. O. AlNabooda, R. M. Shubair, N. R. Rishani a G. Aldabbagh, "Terahertz spectroscopy and imaging for the detection and identification of illicit drugs," in *Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET), 2017*, 2017, s. 1-4.
- [36] A. A. Tseng, K. Chen, C. D. Chen a K. J. Ma, "Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development," *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, vol. 26, no. 2, pp. 141- 149, 2003.

- [37] M. J. Burek a J. R. Greer, "Fabrication and microstructure control of nanoscale mechanical testing specimens via electron beam lithography and electroplating," *Nano letters*, vol. 10, no. 1, pp. 69-76, 2009.
- [38] P. Emami, "Electron beam lithography for nano-antenna fabrication", Ph. D. dissertation, University of Missouri-Columbia, 2015.
- [39] H. H. Lee, E. Menard, N. G. Tassi, J. A. Rogers a G. B. Blanchet, "Large area microcontact printing presses for plastic electronics", in *MRS Proceedings*, vol. 846. Cambridge Univ Press, 2004, s. DD7-3.
- [40] C. -Y. Chang, "The highlights in the nano world," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 11, pp. 1756-1764, 2003.
- [41] H. Goldstein, "The race to the bottom [consumer nanodevice]," *IEEE Spectrum*, vol. 42, no. 3, str. 32-39, 2005.
- [42] M. Meyyappan, J. Li, J. Li a A. Cassell, "Nanotechnology: An overview and integration with mems," in *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'06)*, 2006, s. 1-3.
- [43] Y. J. Yun, C. S. Ah, S. Kim, W. S. Yun, B. C. Park a D. H. Ha, "Manipulation of freestanding au nanogears using an atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 18, no. 50, p. 505304, 2007.
- [44] W.-H. Soe, C. Troadec, C. Manzano, J. Deng, F. Ample, Y. Jianshu a C. Joachim, "Nanogears mechanics: Od jedné molekuly k pevným látkám.

- state nanogears on a surface," in *Single Molecular Machines and Motors*. Springer, 2015, s. 187-196.
- [45] C. Peterson, "Taking technology to the molecular level," *Computer*, vol. 33, no. 1, pp. 46-53, 2000.
- [46] K. E. Drexler, *Nanosystémy: molekulární stroje, výroba a computation*. John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [47] E. L. Wolf, *Nanofyzika a nanotechnologie: Úvod do moderních konceptů v nanov ě d ě*. John Wiley & Sons, 2015.
- [48] V. Balzani, A. Credi, S. Silvi a M. Venturi, "Artificial nanomachines based on interlocked molecular species: recent advances," *Chemical Society Reviews*, vol. 35, no. 11, pp. 1135-1149, 2006.
- [49] R. Ballardini, V. Balzani, A. Credi, M. T. Gandolfi a M. Venturi, "Artificial molecular-level machines: which energy to make them work? " *Accounts of Chemical Research*, roč. 34, č. 6, s. 445-455, 2001.
- [50] V. Balzani, M. G. J. F. Stoddart, "Molekulární stroje". *Accounts of Chemical Research*, roč. 31, č. 7, s. 405-414, 1998.
- [51] G. M. Whitesides, "The once and future nanomachine," *Scientific American*, vol. 285, no. 3, s. 70-5, 2001.
- [52] D. K. Eric, P. Chris a P. Gayle, "Unbounding the future: the nanotechnology revolution," *Produced for the Web by E-SPACES*. New York, 1991.

- [53] R. MERKLE, "Self replicating systems and molecular manufacturing," *British Interplanetary Society, Journal*, vol. 45, no. 10, s. 407-413, 1992.
- [54] A. Cavalcanti, B. Shirinzadeh, R. A. Freitas Jr. a T. Hogg, "Nanorobot architecture for medical target identification," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 1, p. 015103, 2007.
- [55] G. Muthukumar, U. Ramachandraiah, and D. Samuel, "Role nanorobotů a jejich lékařské aplikace," in *Advanced Materials Research*, vol. 1086. Trans Tech Publ, 2015, s. 61-67.
- [56] I. Akyildiz, M. Pierobon, S. Balasubramaniam a Y. Koucheryavy, "The internet of bio-nano things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, s. 32-40, 2015.
- [57] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, N. YOSHIMURA a S. YAMAMOTO, "Internet v ě cí (iot): *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. 97, no. 10, pp. 2568-2575, 2014.
- [58] M. A. Feki, F. Kawsar, M. Boussard a L. Trappeniers, "Guest editors7 introduction," 2013.
- [59] M. H. Miraz, M. Ali, P. S. Excell a R. Picking, "A review on internet of things (iot), internet of everything (ioe) and internet of nano things (iont)," in *Internet Technologies and Applications (ITA)*, 2015. IEEE, 2015, s. 219-224.

- [60] S. Balasubramaniam a J. Kangasharju, "Realizing the internet of nano things: challenges, solutions, and applications," *Computer*, roč. 46, č. 2, s. 62-68, 2013.
- [61] I. F. Akyildiz a J. M. Jornet, "The internet of nano-things," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 58-63, 2010.
- [62] Z. L. Wang, "Towards self-powered nanosystems: from nanogenerators to nanopiezotronics", *Advanced Functional Materials*, roč. 18, č. 22, s. 3553-3567, 2008.
- [63] J. M. Jornet a I. F. Akyildiz, "Graphene-based nano-antennas for electromagnetic nanocommunications in the terahertz band," in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*. IEEE, 2010, s. 1-5.
- [64] M. R. da Costa, O. Kibis a M. Portnoi, "Carbon nanotubes as a basis for terahertz emitters and detectors," *Microelectronics Journal*, vol. 40, no. 4, s. 776-778, 2009.
- [65] Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H.-Y. Chiu, A. Grill a P. Avouris, "100-ghz transistors from wafer-scale epitaxial graphene," *Science*, vol. 327, no. 5966, s. 662-662, 2010.
- [66] K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia a A. Zettl, "Nanotube radio," *Nano letters*, vol. 7, no. 11, pp. 3508-3511, 2007.
- [67] J. Weldon, K. Jensen a A. Zettl, "Nanomechanical radio transmitter," *physica status solidi (b)*, vol. 245, no. 10, pp. 2323-2325, 2008.

- [68] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebei a T. Kurner, "Short-range ultra-broadband terahertz communications: Concepts and perspectives," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 24-39, 2007.
- [69] J. M. Jornet a I. F. Akyildiz, "Channel capacity of electromagnetic nanonetworks in the terahertz band," in *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, s. 1-6.
- [70] L. J. Kahl a D. Endy, "A survey of enabling technologies in synthetic biology," *Journal of biological engineering*, vol. 7, no. 1, p. 1, 2013.
- [71] C. -J. Chen, Y. Haik a J. Chatterjee, "Development of nanotechnology for biomedical applications," in *Conference, Emerging Information Technology 2005*. IEEE, 2005, s. 4pp.
- [72] R. A. Freitas, "Nanotechnology, nanomedicine and nanosurgery," *International Journal of Surgery*, vol. 3, no. 4, s. 243-246, 2005.
- [73] --, "Co je to nanomedicína? " *Nanomedicína: ogy and Medicine*, vol. 1, no. 1, pp. 2-9, 2005.
- [74] D. Patra, S. Sengupta, W. Duan, H. Zhang, R. Pavlick a A. Sen, "Intelligent, self-powered, drug delivery systems," *Nanoscale*, vol. 5, no. 4, s. 1273-1283, 2013.
- [75] R. A. Freitas, "Pharmacytes: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 6, no. 9-10, pp. 2769-2775, 2006.

- [76] B. Wowk, "Cell repair technology", *Cryonics*, vol, str. 21-30, 1988.
- [77] T. Donaldson, "24th century medicine", *Cryonics (December)*, str. 16- 34, 1988.
- [78] J. W. Aylott, "Optical nanosensors-an enabling technology for intracellular measurements," *Analyst*, vol. 128, no. 4, s. 309-312, 2003.
- [79] S. Ravindra, Y. M. Mohan, N. N. Reddy a K. M. Raju, "Fabrication of antibacterial cotton fibres loaded with silver nanoparticles via 'green approach'," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 367, no. 1, pp. 31-40, 2010.
- [80] D. Tessier, I. Radu a M. Filteau, "Antimicrobial fabrics coated with nano-sized silver salt crystals", in *NSTI Nanotech*, vol. 1, 2005, pp. 762- 764.
- [81] R. E. Smalley, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus a P. Avouris, *Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications*. Springer Science & Business Media, 2003, sv. 80.
- [82] M. Endo, T. Hayashi, Y. A. Kim a H. Muramatsu, "Development and application of carbon nanotubes", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 6R, p. 4883, 2006.
- [83] J. Han, J. Fu a R. B. Schoch, "Molecular sieving using nanofilters: past, present and future," *Lab on a Chip*, vol. 8, no. 1, pp. 23-33, 2008.
- [84] S. Shanmuganathan, M. A. Johir, T. V. Nguyen, J. Kandasamy a S. Vigneswaran, "Experimentální hodnocení mikrofiltrace-granulární

hybridní systém aktivního uhlí (mf-gac)/nanofiltru při opětovném použití
vysoce kvalitní vody," *Journal of Membrane Science*, sv. 476, s. 1-9, 2015.