

**Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)**

**Projekt:** Pracovní skupina IEEE P802.15 pro bezdrátové osobní sítě (WPAN)

**Název příspěvku:** Terahertzová komunikace pro nanozařízení na bázi grafenu

**Datum předložení:** 8. listopadu 2010

**Zdroj:** Josep Miquel Jornet, Georgia Institute of Technology

**Adresa:** 777 Atlantic Drive NW, Atlanta, GA 30332, USA

**Tel:** +4 404 894 6616, **Fax:** +4 404 894 7883, **E-mail:** jmjornet@ece.gatech.edu

**Abstrakt:** Nedávné pokroky v oblasti nanomateriálů ukazují na terahertzové pásmo (0,1 - 10,0 THz) jako na frekvenční rozsah činnosti budoucích elektronických nanozařízení. V tomto dokumentu je nejprve podán přehled technologií umožňujících terahertzovou komunikaci mezi zařízeními v nanorozměrech se zvláštním důrazem na konstrukci nanoantén na bázi grafenu. Dále je zkoumána informační kapacita terahertzového pásma v krátkém dosahu. Jsou diskutovány různé způsoby přidělování přenosového výkonu a je navrženo nové schéma založené na výměně femtosekundových pulzů.

**Cíl:** Poskytnout přehled o současném stavu budoucí terahertzové komunikace mezi nanozařízeními a technologiích, které ji umožňují.

**Oznámení:** Tento dokument byl vypracován na pomoc IEEE P802.15. Nabízí se jako podklad pro diskusi a není pro přispívající jednotlivce nebo organizace závazný. Materiál v tomto dokumentu může být po dalším studiu změněn co do formy a obsahu. Přispěvatel(é) si vyhrazuje(jí) právo materiál obsažený v tomto dokumentu doplnit, změnit nebo stáhnout.

**Vydání:** Přispěvatel bere na vědomí a souhlasí s tím, že tento příspěvek se stává majetkem IEEE a může být zveřejněn v rámci P802.15.

# Terahertzová komunikace pro nanozařízení na bázi grafenu

Terahertz Communications for Graphene-based Nano-devices

Josep Miquel Jornet a Ian F. Akyildiz

Laboratoř širokopásmových bezdrátových sítí - Broadband Wireless Networking Laboratory

School of Electrical and Computer Engineering

Georgia Institute of Technology

<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/>

NaNoNetworking Center in Catalunya (N3Cat)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

<https://www.n3cat.upc.edu>

# Náčrt

- Úvod
- Nanoantény na bázi grafenu
- Kapacita terahertzového pásma
- Závěry

# Úvod (1)

- Nanotechnologie umožňují vývoj zařízení v měřítku od jednoho do několika set nanometrů:
  - V tomto měřítku **vykazují nové nanomateriály a nanočástice nové vlastnosti, které** nebyly pozorovány na mikroskopické úrovni.
  - Cílem nanotechnologie je **využití těchto vlastností k vytvoření nových typů strojů,** nikoliv pouze vývoj miniaturních zařízení.

## Úvod (2)

- Jednotlivá nanozařízení mohou zatím plnit **jen velmi jednoduché úkoly**. Mezi příklady (které byly již prototypovány) patří:
  - Fyzikální, chemické a biologické nanosenzory.
  - Nano pinzety, nanomotory, nano ohřívače atd.
  - Nanoprosesory, nanopaměti, logické nanoobvody atd. Nanostroje, Nanoměsta, atd.
  - nanobaterie, palivové nanočlánky, solární fotovoltaické nanočlánky, nanosystémy pro sběr energie atd.

# Nanonetworks

I. F. Akyildiz, F. Brunetti a C. Blazquez, "Nanonetworks: A New Communication Paradigm", Computer Networks Journal (Elsevier), červen 2008.

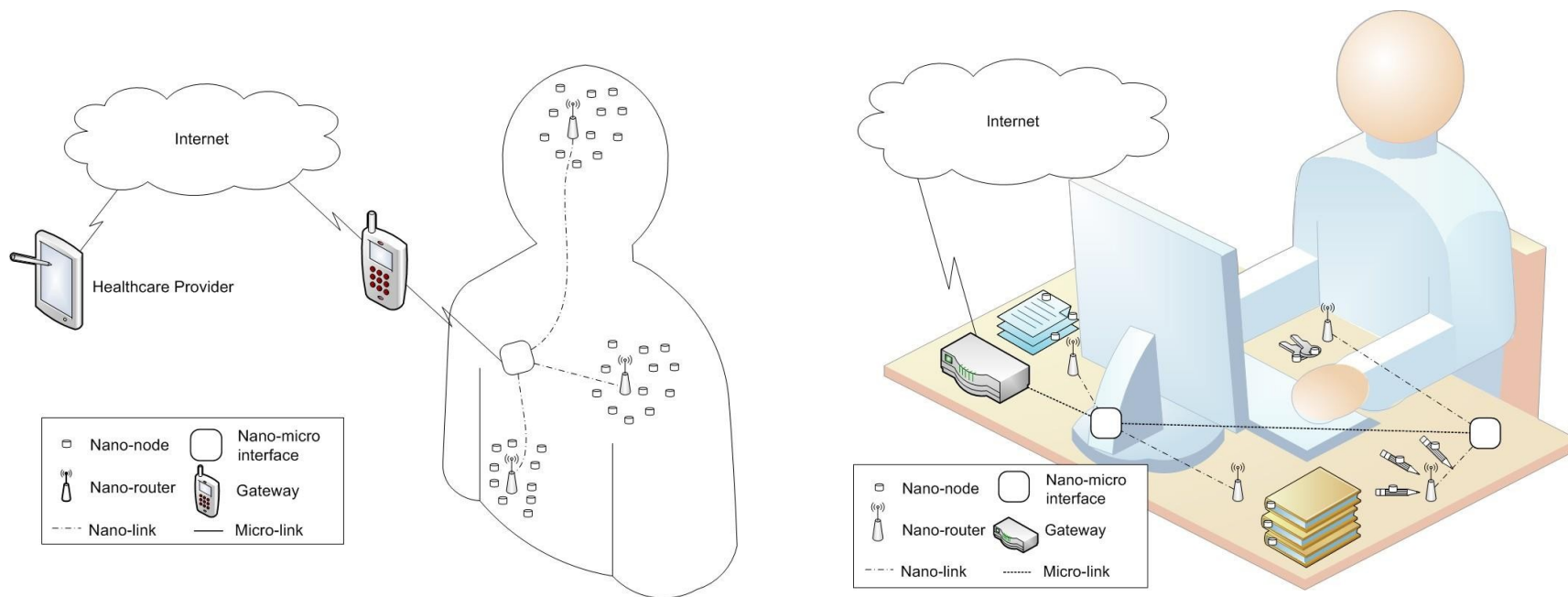
I. F. Akyildiz a J. M. Jornet, "Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks", Nano Communication Networks Journal (Elsevier), březen 2010.

- Podle naší představy bude **integrované nanozařízení** obsahující několik těchto nanosoučástek a s **komunikačními schopnostmi** schopné plnit složitější úkoly.
- Propojení několika těchto nanozařízení do **nanosítí rozšíří možnosti využití nanotechnologií v** biomedicínské, environmentální a vojenské oblasti, jakož i ve spotřebním a průmyslovém zboží.

# Aplikace nanosítí

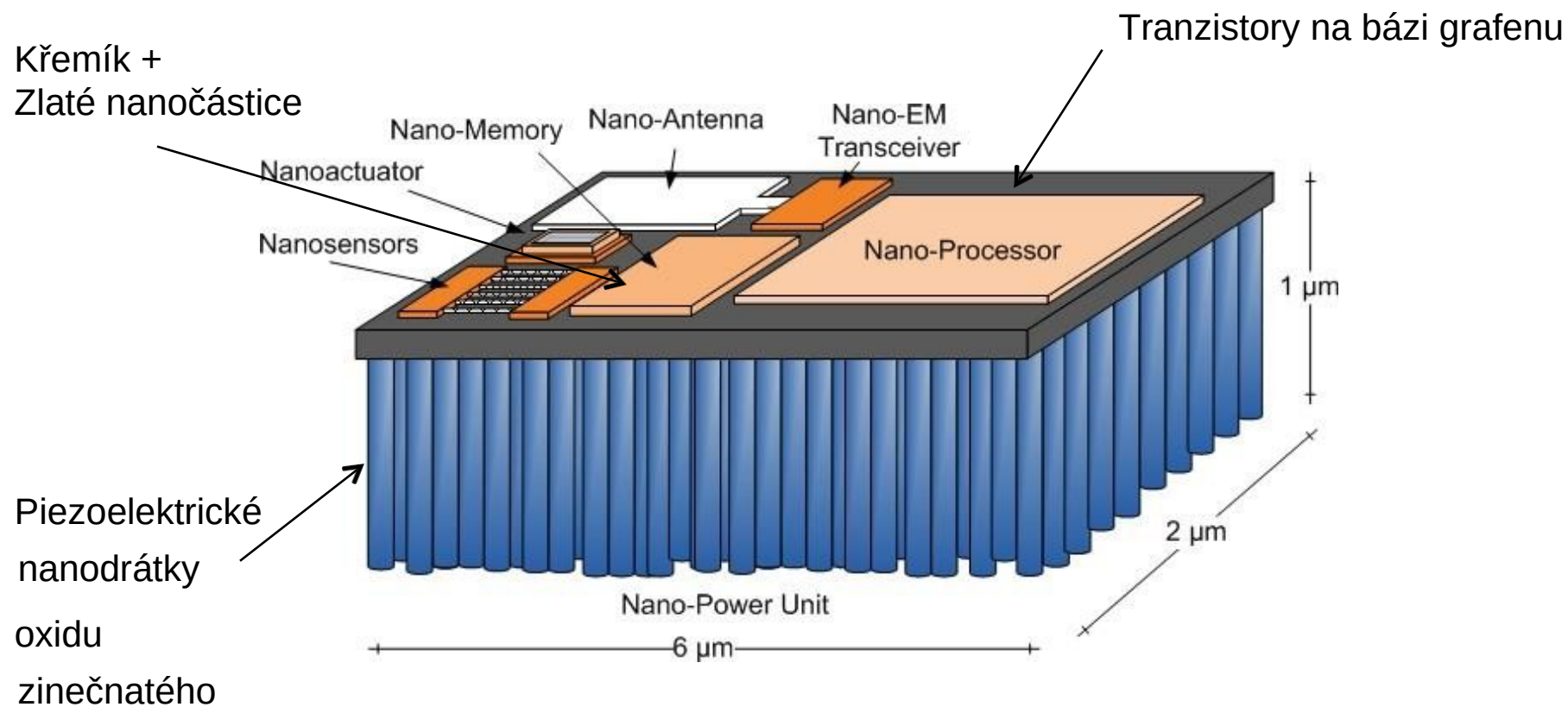
I. F. Akyildiz a J. M. Jornet, "The Internet of Nano-Things", v časopise IEEE Wireless Communications Magazine, prosinec 2010.

## Vnitrotělní nanosítě - Propojená kancelář



# Integrovaná architektura nanozařízení

I. F. Akyildiz a J. M. Jornet, "Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks", Nano Communication Networks Journal (Elsevier), březen 2010.





# Nanokomunikace

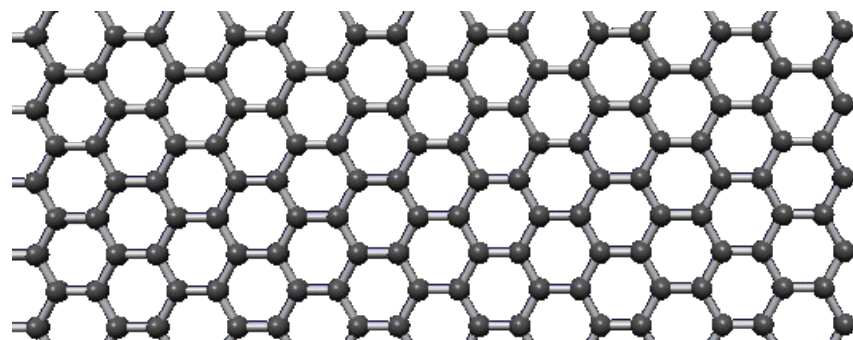
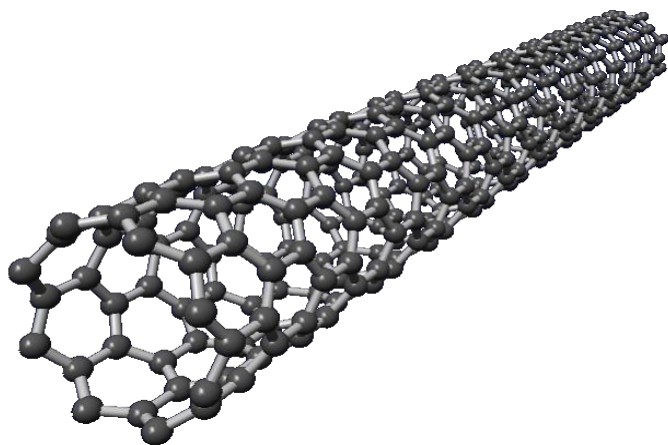
- Klasická komunikační paradigmatata musí být před použitím v těchto zpravodajských scénářích revidována, zejména kvůli velikosti, složitosti a spotřebě energie.
- Nové nanomateriály mohou pomoci při vývoji miniaturních EM-přijímačů:
  - Grafen a jeho deriváty vykazují mimo jiné několik unikátních elektrických a optických vlastností, které z nich činí jednoho z hlavních kandidátů na křemík 21. století.
  - EM vlastnosti těchto nanomateriálů budou určovat komunikační schopnosti nanozařízení, například frekvenční pásmo provozu nebo velikost vyzařovaného výkonu pro danou vstupní energii.

# Náčrt

- Úvod
- **Nanoantény na bázi grafenu**
- Kapacita terahertzového pásma
- Závěry

# Grafen: nanotrubičky a nanovlákná (1)

- **Grafen (1)** je jeden atom tlustý rovinný list vázaných atomů uhlíku v krystalové mřížce tvaru včelích plástů (podobně jako H3O2, EZ voda). Je to stavební materiál:
  - **Uhlíkové nanotrubičky (CNT):** (1991).
  - **Grafenové nanovlákná (GNR):** (2004).



<sup>1</sup> Nobelovu cenu za fyziku za rok 2010 získali jeho objevitelé Andre Geim a Konstantin Novoselov z Manchesterské univerzity v Anglii.

## Grafen: nanotrubičky a nanovlákná (2)

- Mezi jejich hlavní vnitřní vlastnosti patří:
  - Vysoká proudová kapacita + vysoká tepelná vodivost  
**Energetická účinnost.**
  - Extrémně vysoká mechanická pevnost  
**Robustnost.**
  - Velmi vysoká citlivost (všechny jejich atomy jsou exponované)  
**Snímací schopnosti.**
- Nové příležitosti pro technologie zařízení: nanobaterie, nanopaměti, nanoprocesory, nanosenzory... **nanoantény???**

# Nanoantény na bázi grafenu (1)

- V literatuře byly navrženy nanoantény na bázi CNT:
  - **Rychlost šíření EM vlny** přes CNT se mění vlivem několika kvantových efektů:
    - Tyto efekty závisí mimo jiné na rozměrech CNT, geometrii jejich hran, teplotě systému a použité energii.
    - Může být až o dva řády nižší než rychlost šíření EM vlny ve vakuu a ve volném prostoru -> Potřebujeme **nové konstrukce antén**, abychom tento nesoulad snížili.
  - **Kontaktní (kvantový) odpor** CNT je velmi velký, až 12,9 k $\Omega$ .
    - To se projevuje pouze na kontaktech antény -> Pokud **je celé zařízení založeno na grafenu**, neměl by to být problém.

## Nanoantény na bázi grafenu (2)

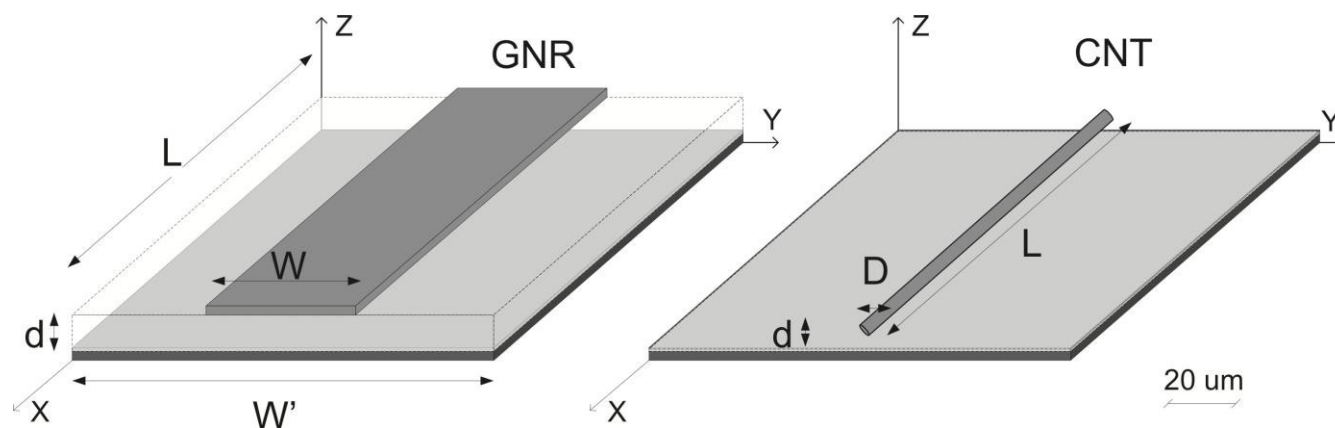
J. M. Jornet a I. F. Akyildiz, "Graphene-based Nano-antennas for Electromagnetic Nanocommunications in the Terahertz Band", in Proc. of 4<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Španělsko, duben 2010.

J. M. Jornet a I. F. Akyildiz, "A Nano-Patch Antenna for Electromagnetic Communications in the Terahertz Band", předloženo k publikaci v časopise, 2009.

- Navrhněte novou konstrukci nanoantény, která je založena na **kovovém vícevodičovém pásmu GNR** a která se podobá nanoanténě.
- Vyvinout **kvantově mechanický rámec** pro přesné modelování vlastností přenosových linek nanoantén na bázi GNR a CNT.
- Získejte **první rezonanční frekvenci a vstupní odpor** nanopatchových a nanodipolových antén na bázi grafenu v závislosti na velikosti antény, geometrii hran a energii.

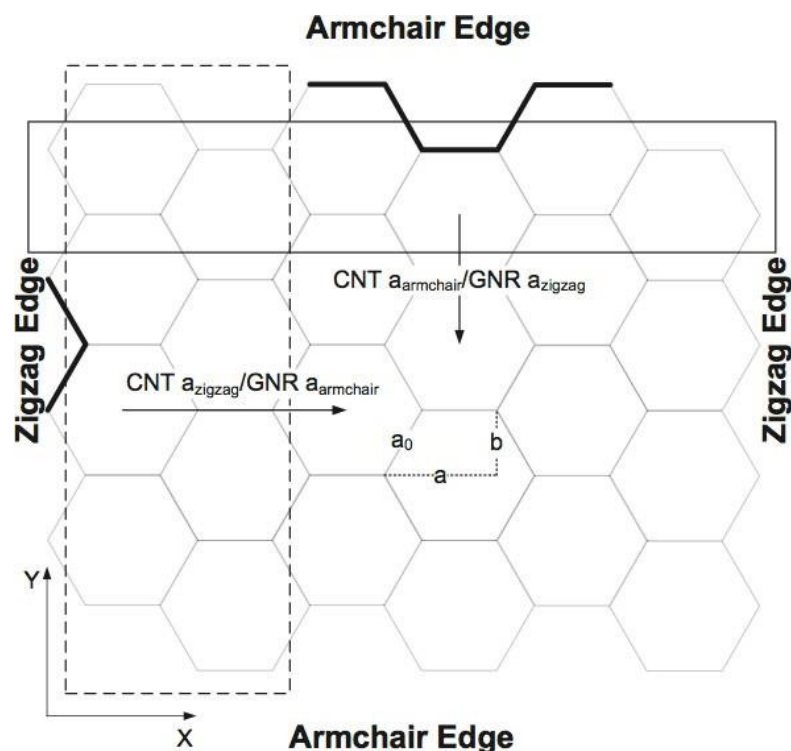
## Nanoantény na bázi grafenu (3)

- GNR lze použít pro **nanopatch anténu**  
2-D anténa.
- CNT lze použít pro **nanodipólovou anténu**  
téměř 1-D anténa.
- V blízké budoucnosti budou možné nové **atomárně přesné konstrukce**. Co třeba vícepásmové nanofraktálové antény?



# Charakterizace vlastností přenosového vedení GNR a CNT (1)

- K analýze vlastností přenosových linek GNR a CNT s atomární přesností používáme **model těsné vazby**.



Pomocí tohoto modelu můžeme v závislosti na **velikosti struktury, geometrii hran, energii a teplotě** vypočítat následující vlastnosti uhlíkové struktury:

1. Energetická pásová struktura a počet vodivostních pásů.
2. Kontaktní odpor ( $RQ$ )
3. Kvantová kapacita ( $CQ$ )
4. Kinetická indukčnost ( $LK$ )



# Charakterizace vlastností přenosového vedení GNR a CNT (2)

- Kromě vlastností přenosového vedení GNR nebo CNT musíme vzít v úvahu **parazitní členy mezi anténou a zemní rovinou**:
  - Elektrostatická kapacita (CE)
  - Magnetická indukčnost (LM)
- Pak,
  - Celková kapacita:  $C^{-1} = C_E^{-1} + C_Q^{-1}$
  - Celková indukčnost:  $L = L_M + L_K$
- A na základě toho můžeme vypočítat
  - Rychlost šíření EM vln (V)
  - Vstupní odpor (R)

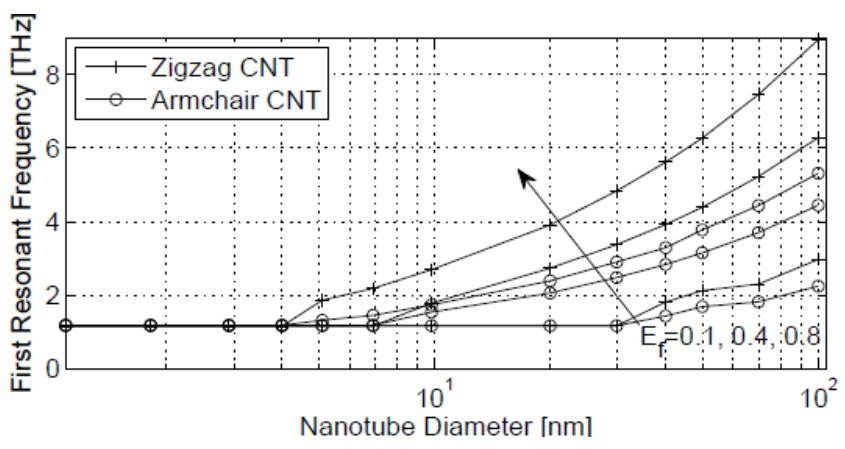
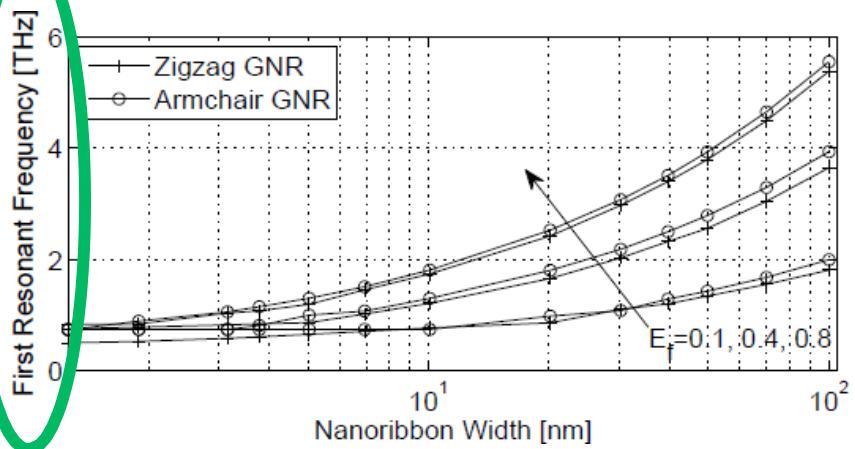
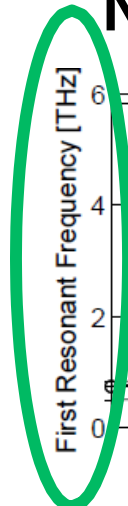
# První rezonanční frekvence nanoantén na bázi grafenu

- Nanoanténa na bázi GNR nebo CNT se chová jako krátká anténa o délce rovné vlnové délce plazmonu.

$$f = \frac{v_p}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}2L}$$

Nano-náplast na bázi GNR

Nanodipól na bázi CNT

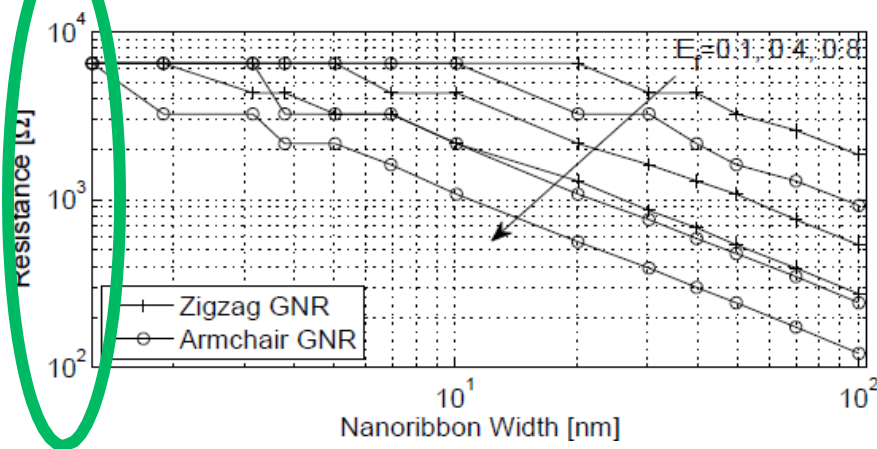


# Vstupní odpor nanoantén na bázi grafenu

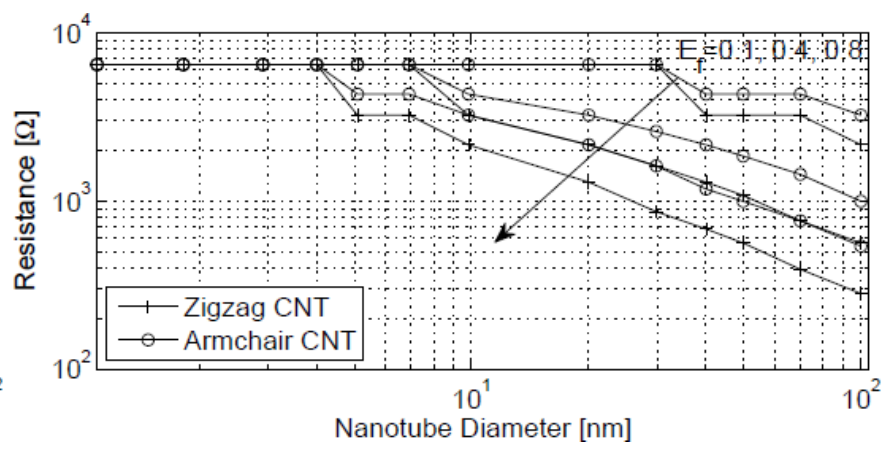
- Kontaktní odpor se objevuje pouze v místě kontaktu antény a závisí na počtu vodivých prvků kapely

$$\mathcal{R}_Q^T \approx \frac{h}{2e^2 M}$$

### Nano-náplast na bázi GNR



### Nanodipól na bázi CNT



# Nanopřijímač na bázi grafenu?

- Slibné výsledky přináší také probíhající výzkum VF aplikací grafenu:
  - Výzkum IBM: VF grafenový tranzistor 100 GHz, nyní směřuje k 1 THz.  
Y. M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H. Y. Chiu, A. Grill, & P. Avouris, "[100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene](#)", *Science*, 2010.
  - Projekt MURI "Graphene Approaches to Terahertz Electronics": zesilovače na bázi grafenu, směšovače signálu,  
...  
H. Wang a T. Palacios, „[Efficiency of Graphene Nanoribbon RF Amplifiers: A Theoretical Analysis](#)“, odesláno do *Electron Device Letters*, září 2008.  
  
H. Wang, D. Nezich, J. Kong, & T. Palacios, "[Graphene Frequency Multipliers](#)", *IEEE Electron Device Letters*, 2009.

# Závěry a budoucí práce na nanoanténách na bázi grafenu

- Grafen lze použít ke konstrukci nanoantén. Vzhledem k několika kvantovým efektům je však k předpovědi jejich frekvenčního pásma vyzařování nutná atomárně přesná analýza:
  - Pro anténu o délce 1  $\mu\text{m}$  je to terahertzové pásmo (0,1-10 THz).
- Můžeme to změřit?
  - Nanoanténa v přenosu: integrace nanoantény s generátorem signálu/zdrojem energie, měření vyzařování.
  - Nanoanténa v recepci: integrace nanoantény s detektorem na bázi CNT.
  - Jako výchozí bod můžeme začít s měřením jeho příčného radarového průřezu.

# Náčrt

- Úvod
- Nanoantény na bázi grafenu
- Kapacita terahertzového pásma
- Závěry

# Terahertzová komunikace pro zařízení v nanorozměrech

J. M. Jornet a I. F. Akyildiz, "Channel Capacity of Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band", in Proc. of IEEE ICC, Cape Town, South Africa, May 2010.

J. M. Jornet a I. F. Akyildiz, "Channel Modeling and Capacity Analysis of Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band", předloženo k publikaci v časopise, 2010.

- S ohledem na výsledky naší práce v oblasti nanoantén,
  - Vyvíjíme **numerický model šíření** pro terahertzové pásmo s důrazem na problémy způsobené **molekulární absorpcí** ve **velmi krátkém pásmu** a získáváme formulace pro **ztráty v kanále a šum**.
  - Navrhujeme nové komunikační schéma založené na přenosu **velmi krátkých pulzů** o délce stovek femtosekund.
  - Zaměřujeme se na **kapacitu kanálu** a získáváme kvantitativní výsledky pro terahertzové pásmo při použití různých schémat přidělování výkonu.

# Ztráty v terahertzovém pásmu

- Na celkových ztrátách dráhy pro šířící se vlnu v terahertzovém frekvenčním pásmu se podílejí zejména:
  - Ztráty **šířením**: zohledňují útlum způsobený rozpínáním vlny při jejím šíření prostředím:

$$A_{spread}(f, d) = 20 \log \left( \frac{4\pi fd}{c} \right)$$

- Ztráta **molekulární absorpcí**: zohledňuje útlum způsobený molekulární absorpcí:

$$A_{abs}(f, d) = \frac{1}{\tau(f, d)}$$

kde  $f$  znamená frekvenci,  $d$  vzdálenost a  $\tau$  propustnost média.



# Přehled molekulární absorpce (1)

- Různé typy molekul rezonují na specifických frekvencích EM spektra:
  - Rezonanční molekula vnitřně vibruje a přeměňuje EM energii na kinetickou energii.
  - Tím je definováno několik přenosových oken, a to nejen v terahertzovém pásmu, ale v celém spektru.
- V terahertzovém pásmu existují tisíce rezonancí, zejména u vody.
  - Když se zamyslíme nad aplikacemi v nanorozměrech, kolik molekul je potřeba k vytvoření významného účinku?
  - Jak molekulární absorpce utváří kanál?

## Přehled molekulární absorpce (2)

- Výpočet molekulární absorpce začíná definicí **transmitance prostředí**  $\tau$ , která měří množství záření, které je schopno projít prostředím.
- Pro určité molekulární složení prostředí a za předpokladu homogenního rozložení molekul můžeme jako první aproximaci transmitance prostředí  $\tau$  použít Beerův-Lambertův zákon jako:

$$\tau(f, d) = \frac{P_o}{P_i} = e^{-k(f)d}$$

kde  $f$  je vlnová frekvence,  $d$  znamená délku cesty,  $P_o$  znamená výstupní výkon,  $P_i$  znamená vstupní výkon a  $K$  je koeficient absorpce média.

## Přehled molekulární absorpce (3)

- Koeficient absorpce média závisí na konkrétní **směsi částic, která** se v kanálu nachází:

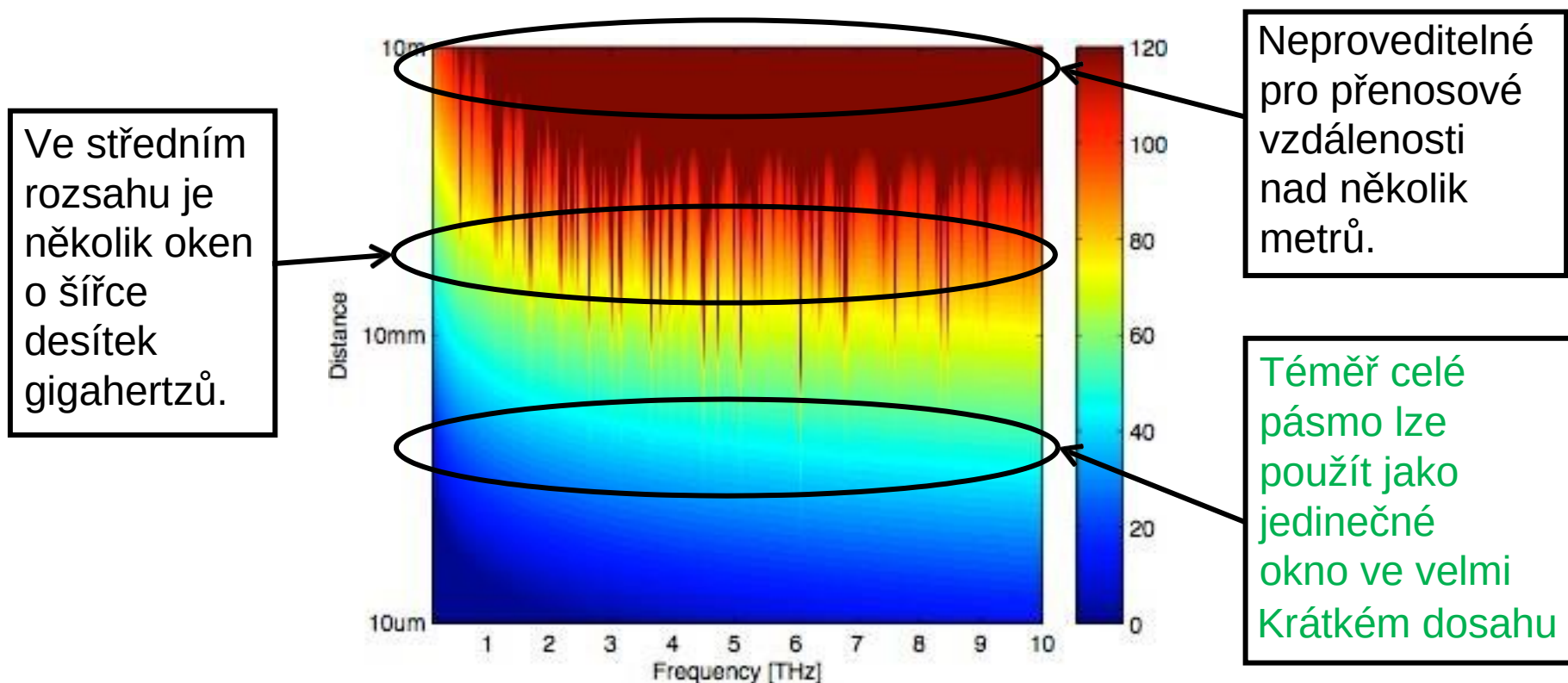
$$k(f) = \sum_{i,g} k^{i,g}(f)$$

kde  $f$  označuje frekvenci a  $k_{i,g}$  označuje absorpční koeficient každého izotopu  $i$  plynu  $g$ .

- Například vzduch v kanceláři se skládá převážně z dusíku (78,1 %), kyslíku (20,9 %) a vodní páry (0,1-10 %).

# Ztráta dráhy v terahertzovém pásmu

## Ztráty na dráze v dB (10 % molekul vodní páry)



## Molekulární absorpční šum (1)

- **Vibrující molekuly znovu vyzařují** část EM energie, kterou absorbují.
  - Můžeme si to představit jako šum mimo fázi, který se vyskytuje pouze na molekulárních rezonančních frekvencích.

- Tento jev se měří pomocí emisivity kanálu  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon(f, d) = 1 - \tau(f, d)$$

kde  $\tau$  znamená propustnost kanálu.

## Molekulární absorpční šum (2)

- Teplotu molekulárního šumu pak získáme jako:

$$T_{mol}(f, d) = T_0 \varepsilon(f, d)$$

kde  $T_0$  označuje referenční teplotu.

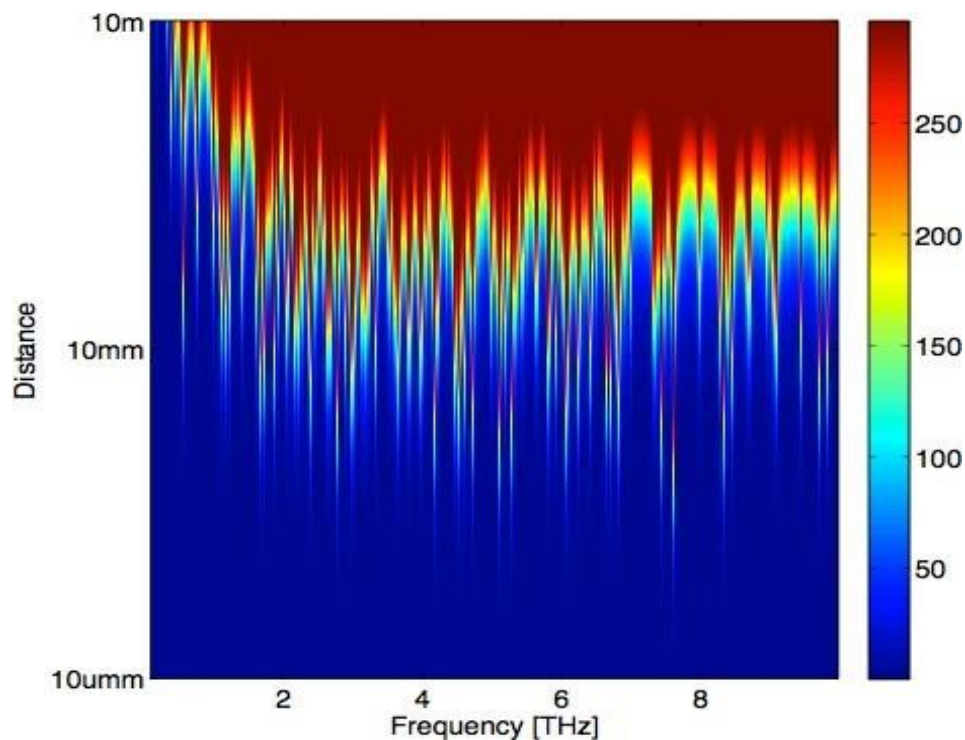
- Nakonec lze výkon molekulárního šumu získat jako:

$$P_n(f, d) = k \int T_{mol}(f, d) + T_{others}(f) df$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $B$  označuje šířku pásma a  $T_{others}$  zohledňuje další zdroje šumu.

# Molekulární absorpční šum (3)

## Teplota šumu v K (10 % molekul vodní páry)



- Mimofázový šum je přítomen pouze v okolí absorpčních bodů.

- V ultrakrátkém rozsahu je téměř zanedbatelný.

## Další zdroje hluku?

- Dobrý šumový model pro grafen stále chybí. Intuitivně,
  - Vzhledem k dlouhé střední volné dráze elektronů v tomto materiálu je klasický tepelný šum očekávaně nízký.
  - V grafenu existují i další zdroje šumu, které jsou charakterizovány, například kvantové omezení elektronů.
    - G. Xu, C. M. Torres, E. B. Song, J. Tang, J. Bai, X. Duan, Y. Zhang, & K. L. Wang, "Enhanced Conductance Fluctuation by Quantum Confinement Effect in Graphene Nanoribbons", *Nano Letters*, 2010.
    - G. Xu, C. M. Torres, Y. Zhang, F. Liu, E. B. Song, M. Wang, Y. Zhou, C. Zeng, C. & K. L. Wang, "Effect of Spatial Charge Inhomogeneity on 1/f Noise Behavior in Graphene", *Nano Letters*, **2010**, *10*, 3312-3317.



# Informační kapacita terahertzového pásma

- Informační kapacitu  $C$  frekvenčně selektivního kanálu lze získat rozdělením celého pásma  $B$  na užší dílčí pásma  $\Delta f$ , která lze považovat za plochá.

$$C(d) = \sum_i \Delta f \log_2 \left[ 1 + \frac{S(f_i) A^{-1}(f_i, d)}{N(f_i, d)} \right]$$

- Kapacita kanálu závisí na ztrátě na kanálu  $A$  a šumu  $N$  a také na použitém schématu přidělování výkonu  $S$ .
  - Jaký je reálný (proveditelný) způsob rozdělení výkonu v tomto pásmu?

# Systemy přidělování výkonu (1)

- Uvažujeme různé výkonové spektrální hustoty (p.s.d.):
  - Kapacita optimální p.s.d. získaná pomocí principu plnění vodou,  $S_{opt}$ :

$$S_{opt}(f) + A(f, d)N(f, d) = K, \text{ and}$$

$$S_{opt}(f) = 0 \text{ if } K < A(f, d)N(f, d)$$

kde  $K$  závisí na celkovém vysílaném výkonu.

- Ploché p.s.d. od 0,1 do 10 THz,  $S_{flat}$ :

$$S_{flat}(f) = S_0 \text{ for } f \in B, 0 \text{ elsewhere}$$

## Systemy přidělování výkonu (2)

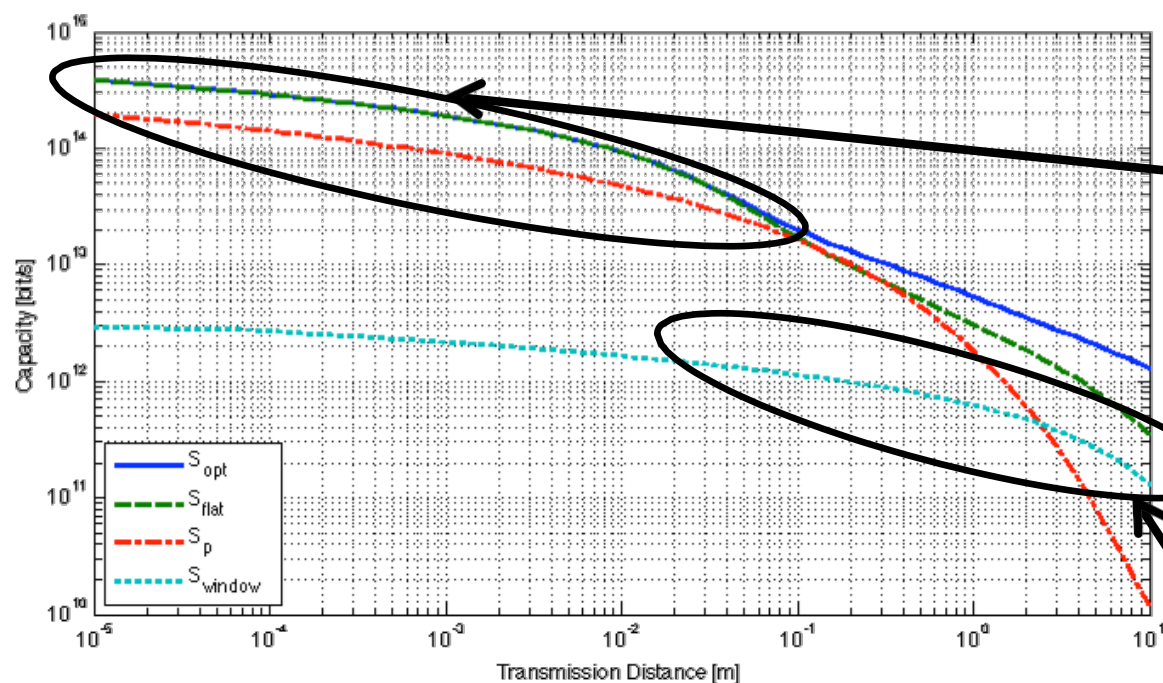
- P.s.d. odpovídající první derivaci femtosekundového Gaussova impulzu  $S_p$

$$S_p(f) = (2\pi ff)^2 a_0^2 e^{-(2\pi\sigma f)^2}$$

kde  $a_0$  je normalizační konstanta zohledňující celkový výkon impulzu.

- Toto schéma přidělování výkonu je inspirováno současnými systémy terahertzové časové spektroskopie.
- Přidělte veškerý výkon v okně 300 GHz.
- V našich výsledcích je celková energie signálu konstantní a rovná se 100 pJ.

# Číselné výsledky



V krátkém pásmu je optimálním řešením rovnoměrné rozložení výkonu v celém pásmu.

Výměna velmi krátkých pulzů je dobrým kompromisem mezi jednoduchostí, proveditelností a efektivním využitím kanálu.

Pro delší přenosové vzdálenosti je využití jednoho okna efektivnější než snaha o využití celého pásma.

# Náčtr

- Úvod
- Nanoantény na bázi grafenu
- Kapacita terahertzového pásma
- Závěry

# Závěry a výzvy v oblasti terahertzové komunikace pro nanozařízení

- Zařízení na bázi grafenu budou schopna pracovat a vyzařovat na terahertzových frekvencích (0,1-10 THz).
- Terahertzové pásmo poskytuje velmi velkou šířku pásma v krátkém dosahu, což umožňuje nové komunikační systémy.
  - Pro velmi krátký dosah lze při přenosu femtosekundových pulzů účinně využít vlastností kanálu.
    - Nová komunikační schémata by měla být navržena s ohledem na **omezení zařízení v nanorozměrech**.
  - Pro komunikaci na krátkou a střední vzdálenost je soustředění přenosového výkonu na jedno okno "kapacitně efektivnější".
    - Obrovská šířka pásma nás vybízí k přehodnocení nejen **komunikačních aspektů bezdrátových sítí, ale také síťových otázek, např.** protokolů MAC pro terahertzové sítě Ad hoc?
- Do vytvoření integrovaného nanozařízení zbývá ještě dlouhá cesta, ale jak výzkum zaměřený na hardware, tak výzkum zaměřený na komunikaci budou mít prospěch z toho, že budou od počátku prováděny souběžně.

# Děkujeme!

Josep Miquel Jornet - [jmjornet@ece.gatech.edu](mailto:jmjornet@ece.gatech.edu)

Prof. Dr. Ian F. Akyildiz - [ian@ece.gatech.edu](mailto:ian@ece.gatech.edu)

Laboratoř širokopásmových bezdrátových sítí @ Georgia  
Tech [www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn](http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn)

Centrum NaNoNetworking v Katalánsku @ UPC  
[www.n3cat.upc.edu](http://www.n3cat.upc.edu)