

## НАНОКОМУНИКАЦИОННИ УСТРОЙСТВА И МРЕЖИ

### Лекция 2. ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ НАНОМРЕЖИ

Доц. д-р инж. Галя Маринова  
2021 г.

## Наноелектроника

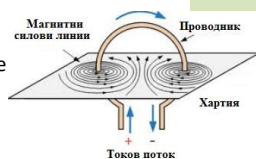


TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## РОЛЯ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТИЗМА

Електромагнетизмът играе сериозна роля при разработването на наноелектронни устройства и комуникационни системи за извличане, контрол, управление и формиране на **комуникационни мрежи** чрез:

- Проводимост
- Електромагнитно сдвояване
- Излъчване и др.



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## Пример на електромагнитна комуникация:

Наноелементите могат да взаимодействат и да комуникират, чрез сдвояване или излъчване на вълни, използвайки антени.

Влияние оказват характеристиките на материалите и околната среда, като:

- Проводимост,
- Електромагнитни загуби,
- Плътност и
- Химически състав.

Получава се и

- Затихване,

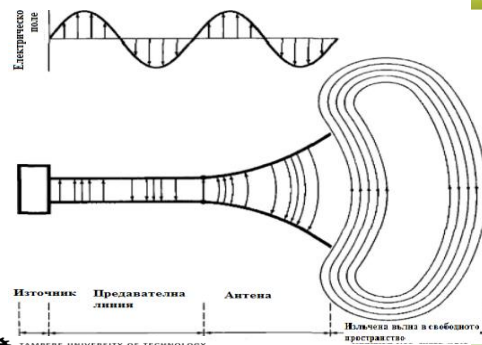
дължащо се на дължината на вълната.

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## Какво представлява антената?

- Антената извършва преобразуване на насочена електромагнитна вълна във вълновод или предавателна линия в електромагнитна вълна разпространяваща се свободно в пространството със специфични насочени характеристики.
- Предавателната линия е среда за разпространение.
- Необходимо е съгласуване на товара с характеристикното съпротивление на предавателната линия за да се избягва ефектът на отражението.

## Място на антената



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## Различни антени

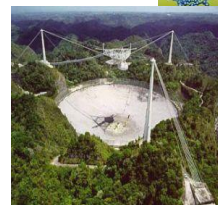


Онлайн калкулатори за проектиране на антени:  
<http://mircheva.free.bg/>  
 Портал за онлайн калкулатори в помощ на комуникациите



## Радиотелескоп Арсебио

Разположена в северозападно Пуерто Рико, обсерваторията Арсебио има **най-голямата радио-антена на света**. Огромната "чиния" има диаметър **305 метра**, дълбока е повече от **50 метра** и заема площ от около **20 акра**.  
 Повърхността ѝ е направена от **40 000 перфорирани алуминиеви панели**, всеки с размер 2x1 метра, които оформят сферичен (а не параболичен) рефлектор.  
 На 150 метра над рефлектора е окачена 900-тонна платформа, висяща на три подсилени бетонни кули. Общо **26 електромотори** контролират платформата. Тези двигатели управляват азимута и купола с точност до милиметри.



Системата в Арсебио работи на честоти от **50 MHz до 10 GHz** (дължини на вълните между 6 m и 3 cm). С помощта на високочувствителни приемници, охладени до температура 20K, е възможно да се изучават **изключително слаби радиоизлъчващи обекти**.

Построен през 1963 г., на 16.11.1974, от Арсебио е изпратено **първото радиосъобщение до евентуалните извънземни цивилизации** - основните химични вещества, ДНК, схема на Слънчевата система и опростени рисунки на човек и на телескопът в Арсебио.



## Най-големия радиотелескоп "FAST", "китайското всевиждащо око", 2016 г.



С диаметър е 500 метра, Китай детронира, намиращия се в база Арсебио - Пуерто Рико, най-голям досега (300 м.) телескоп за търсене на живот извън нашата галактика.  
 Изграждането на телескопа е продължило 5 години, а предварителните планове и проектирането му са отнели 10. Хиляди инженери и работници живеят непосредствено до строежа от 2011 г. насам.

<https://www.mediapool.bg/v-kitai-zavarshi-stroezha-na-nai-golemiya-teleskop-v-sveta-news251233.html>



## Антенна теория

Работата на антената се управлява от фундаменталните закони на електромагнетизма: **Променяният се във времето ток създава електромагнетично излъчване.**

Основната цел при проектирането на антената е: Управляем процес на електромагнитното излъчване.

Да се постигне такава структура, която да трансформира **максимално ефективно** входната мощност в електромагнитно излъчване.

Далече от антенната структура, електромагнитното поле, може да се разглежда **като повърхостна вълна.**

Литература

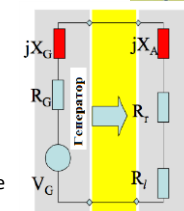
[1] Никола Додов, Антени и СВЧ устройства, София



## Еквивалентна схема на антената в предавателя



- Предавателят и предавателната линия са представени чрез еквивалентен генератор на Тевенен.
- Антената е представена чрез входен импеданс (честотно-зависим и се влияе от близките околни обекти) – генераторен импеданс, от гледна точка на генератора.
- $jX_A$  – натрупана енергия в електрическите  $E_e$  и магнитните  $E_m$  компоненти в близкото поле.



Ако:  $|E| = |E_{nl}$ , то:  $X_A = 0$

**Резонанс на антената**

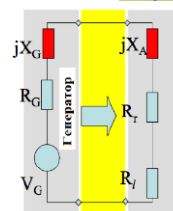
R. Stuzak



## Еквивалентна схема на антена (1)

$R_f$  – представлява енергията излъчена в пространството – компоненти в далечното поле;

$R_l$  – представлява енергийните загуби, например под формата на топлина в антенната структура.



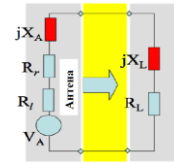
R. Stuzak



### Еквивалентна схема на антената в



- Антената и предавателната линия са представени чрез еквивалентен генератор на Тевенен.
- Предавателят е представен чрез входния импеданс, от гледна точка на извода на антената (например преобразуван от предавателната линия).
- $V_A$  е индуцираното от инцидентната вълна напрежение от извода на антената, определен, когато антената е в режим на отворена верига.



**Импедансът на антената е един и същ, независимо дали излъчва или приема.**

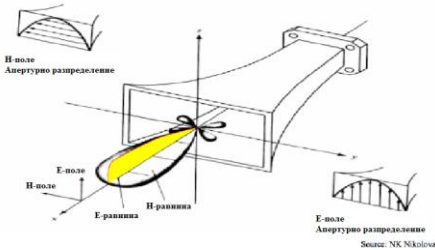
### Параметри на антените

При проектиране или тестване на антена се вземат предвид следните параметри:

- Импедансно съгласуване,
- Радиационна диаграма (Radiation pattern),
- КПД,
- Усилване,
- Поляризация.

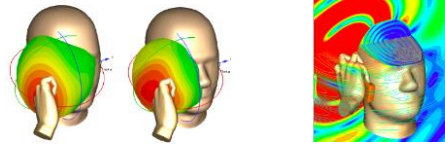
### Радиационна диаграма

Представяне на разпределението на излъчената мощност/приет мощност от/в антената във функция на насочените ъгли от антената.

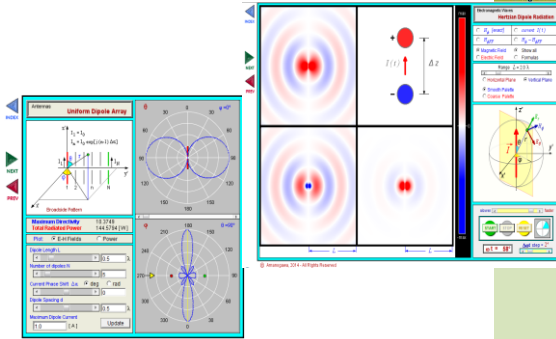


### Радиационна диаграма

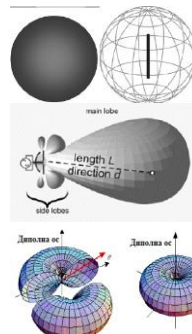
- Радиационните диаграми се измерват, там където пространственото разпределение на излъчената мощност не зависи от разстоянието от източника на излъчване.
- Не зависи от това дали антената е в предавателя или приемника
- Може да се променя в зависимост от честотата, поляризацията или в зависимост от формата на антената.



<http://www.amanogawa.com/archive/AnnArray/AntennaArray-2.html>



### Изотропни, насочени и омниасочени радиационни диграми



- **Изотропната антена** представлява хипотетична концепция, ползвана за референция при описанието на реалните антени – има едно и също излъчване във всички посоки и се изобразява като сфера.
- **Насочената антена** излъчва мощност в дадена посока. Например horn или patch антени.
- **Ненасочена диаграма** – обикновено се отнася за диполните антени.

## Коефициент на полезно действие на антенната



КПД-то на антенната е отношението между излъчената мощност към входната мощност на антенната.

$$\epsilon_R = \frac{P_{\text{radiated}}}{P_{\text{input}}}$$

За антени с форми на чиния и хорн е близо 100%, докато масовите електронни устройства като мобилни телефони и wifi антени, кпд-то е между 20% и 70%.

КПД-то на антенната зависи от формата, околната среда и други условия, които водят до загуби.

## Коефициент на усилване на антенната



Максималното усилване на антенната е в посоката на най-силното излъчване на антенната. Коефициентът на усилване на антенната е произведение между коефициента на насочено действие и кпд-то.

$$G = \epsilon_R D$$

Няма мерни единици и обикновено се измерва в dB.

Силно зависи от типа на антенната. Например антените с насочено действие като хорн антените имат относително по-голямо усилване от диполните антени.

## Измерване на коефициентите на усилване на антените



## Предаване на мощност от предавателя в приемника (Tx-Rx)



$$P_R = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

$\lambda$  – дължина на вълната [m]  
 $r$  – разстояние



$P_R$  – мощност в приемащата антена

$P_T$  – мощност подадена към излъчващата антена

$G_R$  – коефициент на усилване на приемащата антена

$G_T$  – коефициент на усилване на излъчващата антена

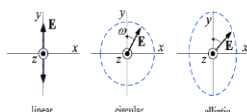
## Поляризация



Във всеки момент в избрана референтна точка в пространството, съществува един електрически вектор  $E$  и свързания с него магнитен вектор  $H$ .

Резултантен от съпоставянето на моментните полета, създадени от активните в момента източници на излъчване.

Три вида поляризация – линейна, кръгова и елиптична.



**Линейна поляризация** - Посоката на векторите  $E$  и  $H$  е константа.

**Кръгова поляризация** - Полетата не си сменят силата, а само посоката.

**Елиптична поляризация** - Полетата  $E$  и  $H$  променят силата си.

<http://www.amanogawa.com/archive/Polarization/Polarization.html>

## Близко и далечно поле



- ЕМП се разпространяват като вълни и се движат със скоростта на светлината ( $c$ ). Дължината на вълната е пропорционална на честотата.
- Ако разстоянието до източника на излъчване е **3 пъти дължината на вълната**, това се нарича **район на близко поле**.
- Ако то е **по-голямо 3 пъти  $\lambda$** , това се нарича **район на далечно поле**. Разликата между близко и далечно поле е **важно само при измерване във ВЧ обхват**. Характеристики на двата района са различни.
- Пример моторна лодка. Ако извънбордовият мотор представлява източника на излъчване, то той прави вълни във водата. Близко до витлото всички вълни са преплетени - районът на близкото поле. **Връзката между силата на електрическото и магнитното поле не е постоянна**, затова те винаги трябва да се мерят по отделно.
- С отдалечаване от витлото на лодката, вълните стават все по-обособени и симетрични - район на далечно поле. Съществува **постоянна връзка между електрическото и магнитното излъчване**, затова се използва терминът **“електромагнитно излъчване”**. Връзката между двете полета позволява да се изчисли интензитетът на полето във ватове на квадратен метър ( $W/m^2$ ).

<http://www.efield.bg/characteristics.html>

## Близко и далечно поле (1)

Район на близкото поле: Кръговото разпределение на енергията зависи от разстоянието от антената. Доминират реактивните полеви компоненти като L и С.

Район на далечното поле: Кръговото разпределение на енергията не зависи от разстоянието от антената. Доминират излъчващите полеви компоненти R.

Резултантното електромагнитно поле може локално да се разглежда като равномерно.



## Таблица на честотите, услугите и дължините на вълните, съгласно международните стандарти

Таблица на честотите, услугите и дължините на вълните, съгласно международните стандарти.

| Честота(f) | Източник                  | Дълж. вълна(λ) |
|------------|---------------------------|----------------|
| 50 / 60 Hz | Електрозапирване          | 6000 / 5000 km |
| 50 kHz     | Заваряване                | 6 km           |
| 27 MHz     | СВ радио                  | 11.1 m         |
| 100 MHz    | FM радио                  | 3 m            |
| 433 MHz    | Индустриални приложения   | 0.7 m          |
| 900 MHz    | Мобилни телефони          | 0.33 m         |
| 2.45 GHz   | Микровълни                | 0.12 m         |
| 6 GHz      | Радио-релейни предаватели | 0.05 m         |
| 20 GHz     | Сателити                  | 0.015 m        |

$\lambda = c / f$   $c = 300,000,000$

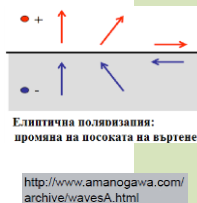
<http://www.efield.bg/characteristics.html>

## Теория на образа

Теорията на образа се прилага, когато антената се намира над идеално равнинна провеждаща повърхност.

- Компонентите на тангентното електрическо поле=0.
- Вертикалните компоненти са с еднаква посока.
- Горизонталните компоненти са в обратна посока.

Полето над повърхността е такова, все едно, че повърхността е заместена от **огледалния образ на антената**.



<http://www.amanogawa.com/archive/wavesA.html>

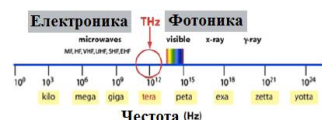
## Наноантени

Промянящите се във времето ЕМП в един проводник излъчват вълни през антената;

Тези излъчени вълни позволяват комуникация с други електронни устройства.

### Необходимост от наноантени

- Миниатюризирани антени за нанокомуникационни системи
- Наноантените могат да използват Терахерцовата честотна лента, заради електрическия размер и дължина на вълната.



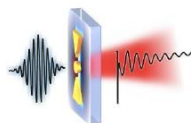
## За и против наноантените

### За:

Използване на огромната свободна честотна лента – без ограничения за мощността, размера и проникването; Предаване на Гига и Тета битове данни за секунда.

### Против:

Зависимост от материалите и обхвата.



## Мотивация за терахерцовата честотна лента

Постигане на висока скорост на безжичните комуникационни системи в различни среди.

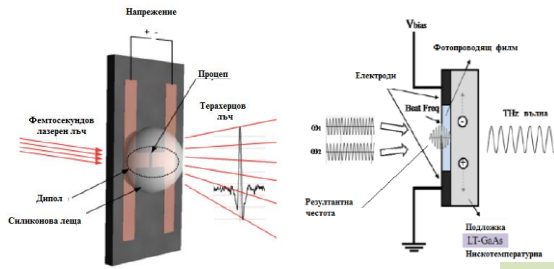
Реализацията на малки антени за малки наномашини.

Намаляване на дължината на вълната, за да се постигнат честоти от терахерцовата лента.

През последните 30 години, скоростта на безжичното предаване на данни е дублирало на всеки 18 месеца. (**Закон на Едхолм**)

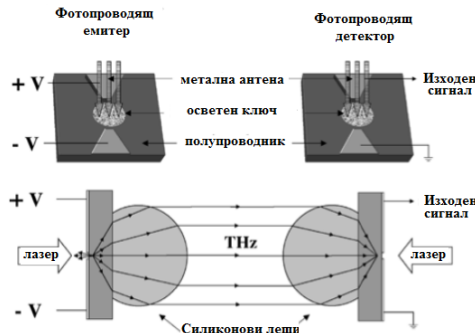
Безжични връзки със скорости от Tbps ще станат възможни през следващите 5-10 години.

### Предаване и детектиране чрез наноантени

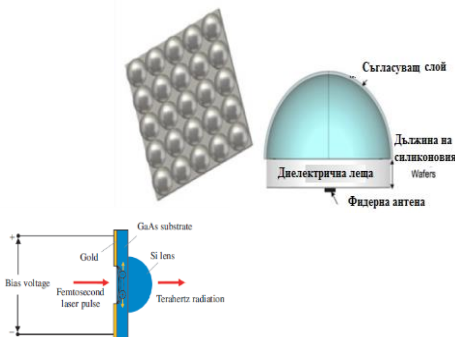


Диполна фотопроводяща антена      Схема на фотосмесителен емитер  
 Ian S. Gregory, et al. "Optimization of Photomixers and Antennas for Continuous-Wave Terahertz Emission,"  
 IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.41, no.5, 2005

### Фотопроводящи емитер и детектор



### Наноантени

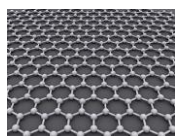


### Приложения на наноантените

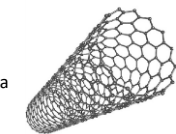


### Използване на новите проводими наноматериали за наноантени

- Сребърни наночастици
- Въглеродни нанотръби (CNT)
- Проводими мастила на базата на графен



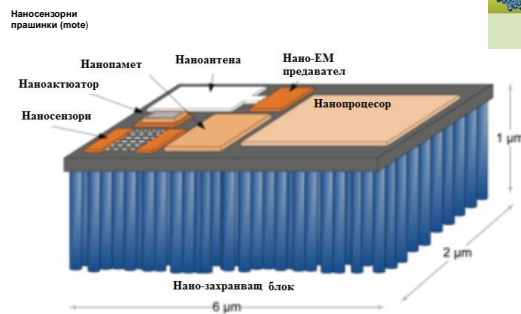
Единичен слой графен



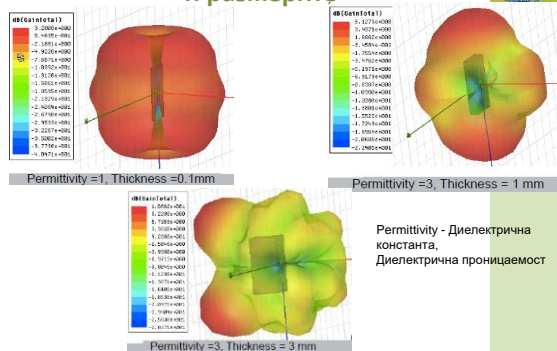
Нано-пач антените на базата на графен показват нови свойства, различни от тези на металните антени

Квантовите ефекти ще са в основата на нано-електромагнитните комуникации

### Наноантени в наносистема



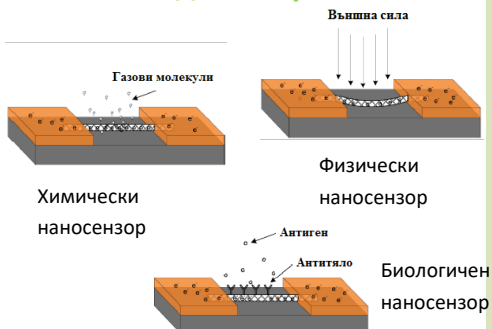
## Влияние на свойствата на материала и размерите



## Предизвикателства

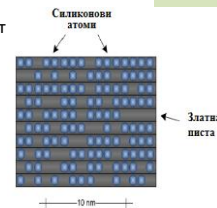
- Производство и измерване на наноструктури интегрирани с наноустройствата
- Влияние на материала върху комуникацията и качеството на наноантената
- Цена и комерсиализация
- Деградирани от околната среда и атмосферните условия
- Интегриране със съществуващите мрежови архитектури и необходимост от нови протоколи
- Надеждност и устойчивост
- Кпд

## Бъдещето на нанодетекторния блок



## Златни нанопамети

- Памети от 1 атом: Съхраняване на 1 бит в един атом
- Ричард Фейнман ги дефинира през 1959 г.
- В неговия пример 5x5x5 атома са използвани за съхранението на 1 бит с избягване на междусимволна интерференция – 125 атома за бит
- **ДНК използва 32 атома за бит**
- Пример за това са златните нанопамети.

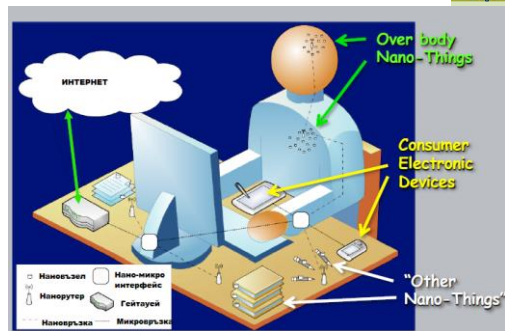


## Терамрежи – на нанониво, на базата на графен

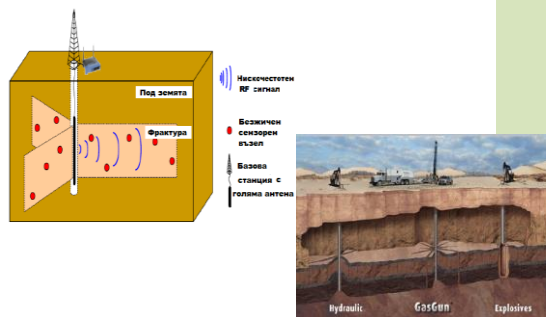
- Цел: Да се установи теоретична и експериментална база на ултра-broadband нанониво за комуникационните мрежи в Терагерцовата лента (0.1-10 THz)



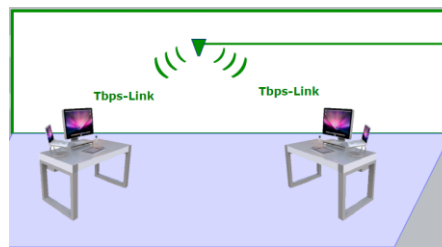
## Интернет на нанонещата



## Нанороботи за откриване и управление на находища на петрол



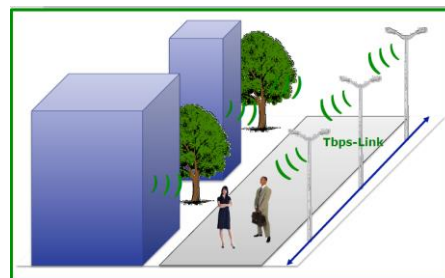
## Безжични ултрависокоскоростни вътрешни мрежи



## Терахерцова комуникационна лента за малки клетки за 4G+ клетъчни системи



## Безжичен достъп до 5G+



## Канал на терахерцовата лента

Каналът на THz лента силно зависи от:

- Молекулярния състав на средата (специално молекулите на водната пара)

• Разстоянието на предаване

Каналът на THz лента осигурява огромна ширина на лентата BW, но само за много къси разстояния:

За разстояния под 1 m:

- Близо 10 THz ширина на предавателния прозорец;

**Възможни са 100 Tbps връзки!**

За разстояния между 1 и 10 m:

- Няколко мулти-GHz- широчини на предавателните прозорци;

**Няколко Tbps връзки са възможни!**

## Мултипат канал

Рейли фадинг, Рисан фадинг и други мултипат разпространения и модели на фадинг

– Игнорират се особеностите на разпространението на вълните в THz лента

– Фокусирано върху специфични под-прозорци в THz лента

– Правят се предположения за броя на пътищата и за броя коефициенти на усилване

- Мултипат разпространението може да постигне по-малки загуби

- За разстояние под 1 m:

– Multipath fading играе важна роля

– Каналът на THz лента се държи като единичен предавателен прозорец, широк почти 10THz

- За разстояния между 1 и 10 m:

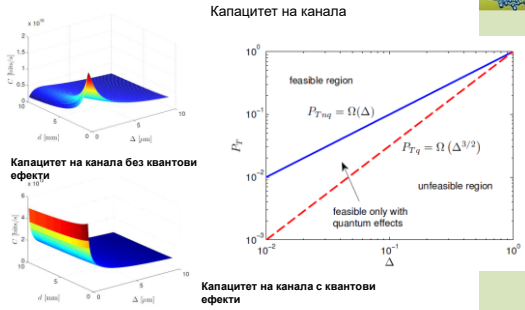
– Намалява вличието на индиректните лъчи

– Граници на молекулярната абсорбция на канала на THz лента към множество от мулти-GHz-виоки прозорци

C. Han, J.M. Jornet and I.F. Akyildiz, "Statistical Multipath Propagation Modeling and Fading Analysis in Terahertz Band Communication Networks", submitted for journal publication, 2013



Мащабируемост на капацитета на канала за електромагнитните наномрежи



Ignacio Llatser, Albert Cabellós-Aparicio, Eduard Alarcón, Josep Miquel Jornet, Ian F. Akyildiz, "Scalability of the Channel Capacity of Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band", submitted to IEEE Transactions on Wireless Communications.

Модулации на Терахерцовата лента

Класическите модулации не могат да използват напълно потенциала на канала за Терахерцовата честотна лента:  
 – Не отчитат уникалната зависимост между наличната ширина на честотната лента BW и разстоянието на предаване  
 – За разстояния между 1 и 10 m:  
 • Няколко прозореца с ширина по 10 GHz всеки  
**Необходими са Нови модулации, адаптируеми към разстоянието**  
 – За разстояние под 1 m:  
 • Прозорец със ширина почти 10 THz  
**Нови модулации основани на фемтосекундни импулси**

J.M. Jornet and I.F. Akyildiz, "Information Capacity of Pulse-based Wireless Nanosensor Networks", Proc. of the 8th Annual IEEE SECON, Salt Lake City, Utah, June 2011.

Възможни нови модулационни техники и анализ на капацитета

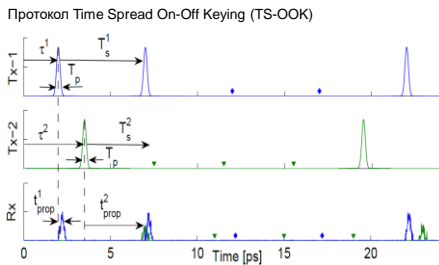
Нова модулационна схема основана на обмяната на фемтосекундни импулси, разпръснати във времето:  
**TS-OOK (Time Spread On/Off Keying Mechanism) On/Off ключов механизъм разпределен във времето – нов протокол**  
 • Времето между импулсите >> Продължителността на импулсите  
 • Позволява едновременно предаване от различни потребители, почти без колизии  
 • Анализ на характеристиките с оглед на информационна скорост и капацитет на мрежата постижими за индивидуалния потребител  
 – Разработва се нов статистически модел на интерференцията в THz лента.

Възможни нови модулационни техники и анализ на капацитета



Кодове с ниска сложност и изчислителна тежест за да се избегнат грешките при предаване от самото кодиране, вместо да се оправят

Модулации и протоколи



Joan Capdevila Pujol, Josep Miquel Jornet, Josep Solé-Pareta, "PHLAME: A Physical Layer Aware MAC Protocol for Electromagnetic Nanonetworks", to appear in Proc. 1st IEEE International Workshop on Molecular and Nano Scale Communication.

Управление на грешката

Кодирането отнема много време и енергия  
 Комуникации към изчисления???  
 – Опция 1: Да се дефинират нови политики за оптимално управление на кодовете...  
 • С оглед на очакваните времена на предаване на един бит, консумация на енергия за бит и вероятност за битова грешка  
 – Опция 2: Дефиниране на много по-прости схеми за кодиране...  
 • Съобразено с особеностите на грешките при предаване в Терахерцовата лента  
 • Идея:  
 – Кодове с ниска сложност и изчислителна тежест за да се избегнат грешките при предаване от самото кодиране, вместо да се оправят  
 – Като се анализира приносът на тежестта на кодирането за индивидуалния потребител, за да се постигне максимална информационна скорост  
 J.M. Jornet and I.F. Akyildiz, "Low-Weight Channel Coding for Interference Mitigation in EM Nanonetworks in the Terahertz Band", Proc. of IEEE ICC, Kyoto, Japan, 2011.

## Рояк от комуникационни мрежи и сензори

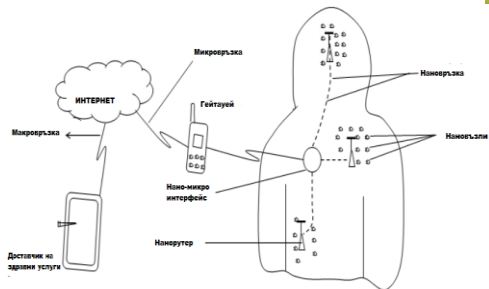


Стотици и хиляди миниатюризирани сензорни възли комуникиращи един с друг с цел здравни грижи, Мониторинг на условията в околната среда, отбраната и др.

- Множество IoT формират рояк (гъмжило) **swarm** от мрежи



## Структура на нанокомуникационни мрежи и нано-микро интерфейс към ИНТЕРНЕТ



## Приложения на нанокомуникационни мрежи



Безжични сензорни мрежи на наноиво (WNSN)

Предложени от Ian F. Akyildiz, Georgia Institute of Technology

Приложими за:

- Откриване на болести в човешкото тяло и кооперативни системи за подаване на лекарства
- Интернет на нано-нещата (обектите)

Съществуващите мрежови протоколи и техники не могат да се приложат директно за комуникация между наномашини защото са:

- Прекалено сложни
- Не отчитат техните енергийни изисквания
- Много малки нано-батерии
- Силно зависещи от събирането на енергия energy harvesting

