

# Nové trendy v oblasti bezkabelové optické komunikace

OTAKAR WILFERT, PETER BARCÍK, ALEŠ DOBESCH

VUT v Brně

Radiokomunikace 2015

Pardubice, říjen 2015

# Osnova

## Úvod

- 1 Současný stav v oblasti bezkabelové optické komunikace (vývoj trhu, definice, dělení)
- 2 Optimální rozložení optické intenzity ve svazku vzhledem k odolnosti spoje vůči atm. jevům
- 3 Standardní a nestandardní (podceňované) atmosférické jevy
- 4 Nové trendy a aplikace bezkabelové optické komunikace

## Závěr



# Současný stav

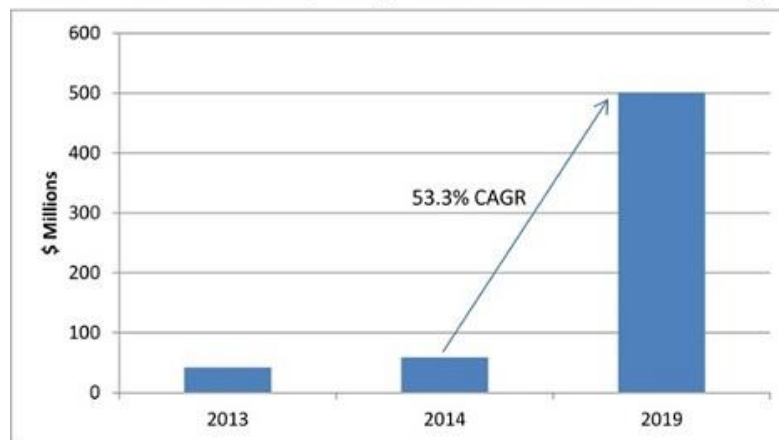
## Analýza situace na trhu technologií BOK ukazuje dobrou prognózu

Za neúspěchem některých výrobců BOK technologie v minulosti stojí hlavně neúplné představy o reálných možnostech těchto spojů a cenová nedostupnost použité technologie.

- **Podceňování** některých atmosférických jevů (turbulence, deformace konzol větrem a/nebo teplotou, námrazy, nečistoty na průzorech, hmyz, ptáci ...)
- Podceňování deformace laserového záření vlivem difrakce a refrakce
- Nabízení drahých systémů pro zamíření a systémů adaptivní optiky



Global Market for Free-Space Optical Communications Technology



Source: BCC Research (PHO018A), March 2015



### Absolutizace výhod BOK:

- ❖ Vysoká přenosová rychlost
- ❖ Bezpečnost provozu
- ❖ Absence legislativních překážek
- ❖ Nízká hmotnost, snadná instalace

# Současný stav

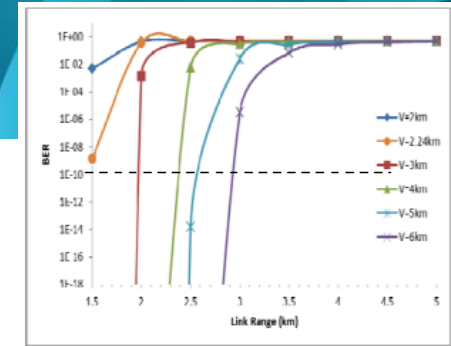


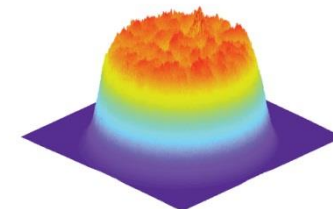
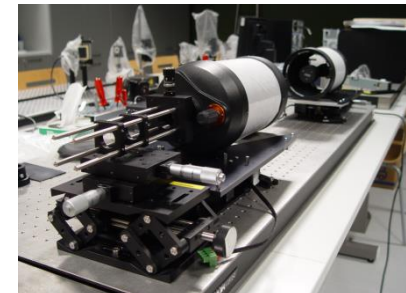
Figure-5. BER verses range (km).

## Požadavky uživatelů technologií OBK jsou: (*nutnost kompromisů*)

- vysoká přenosová rychlost (10 Gb/s +),
- vysoká dostupnost (99,999%) a
- dosah 3 km – 5 km.

Těmto požadavkům se podřizuje výzkum (také na našem pracovišti):

- ✓ Vyvinuli jsme a testujeme **hybridní spoj** s optickým kanálem (1550nm) a radiovým kanálem (122GHz).
- ✓ Dokončujeme výzkum **plně fotonických** transceiverů, který vede jak ke zkvalitnění testovacích spojů (komplexnímu poznání projevů atmosféry), tak ke zkvalitnění datových spojů s novou aplikací - přenos času.
- ✓ Věnujeme se výzkumu optimálního **rozložení světla ve svazku** s cílem zvýšit odolnost přenosu vůči turbulenci atmosféry.



# Současný stav

## Hrubé dělení bezkabelových optických spojů podle prostředí a způsobu použití



Další dělení: podle délky vlny nosné, způsobu provozu, přenosové rychlosti, určení atd.

# Současný stav

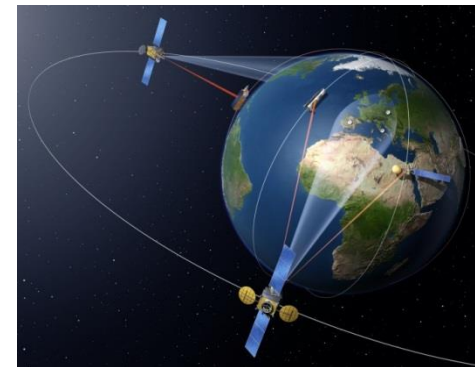
## Příklady aplikací BOK



**Hlavice  
terestriálního  
spoje**



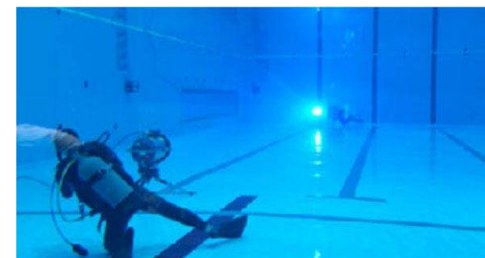
**Terestriální síť spojů  
BOK s MESH topologií**



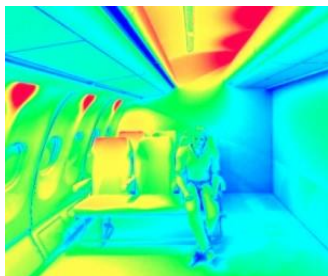
**Použití BOK spojů v  
kosmickém prostoru a  
letectví**



**VLC aplikovaná  
u motocyklu**



**Výzkum podvodní  
aplikace spojů BOK**



**Situace uvnitř letounu - pokrytí světlem  
(osvětlení a komunikace = VLC)**



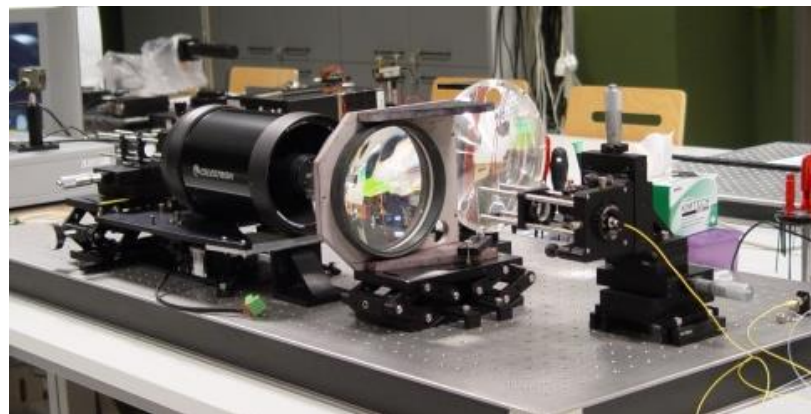
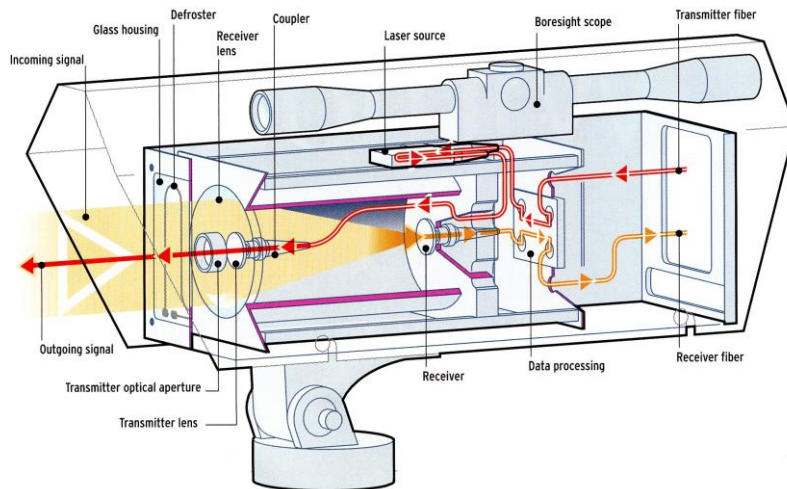
# Současný stav

## Definice

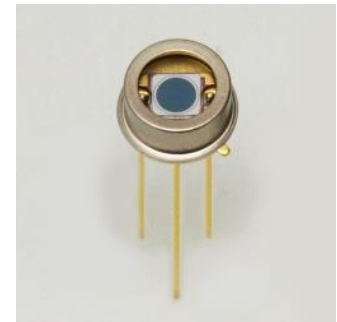
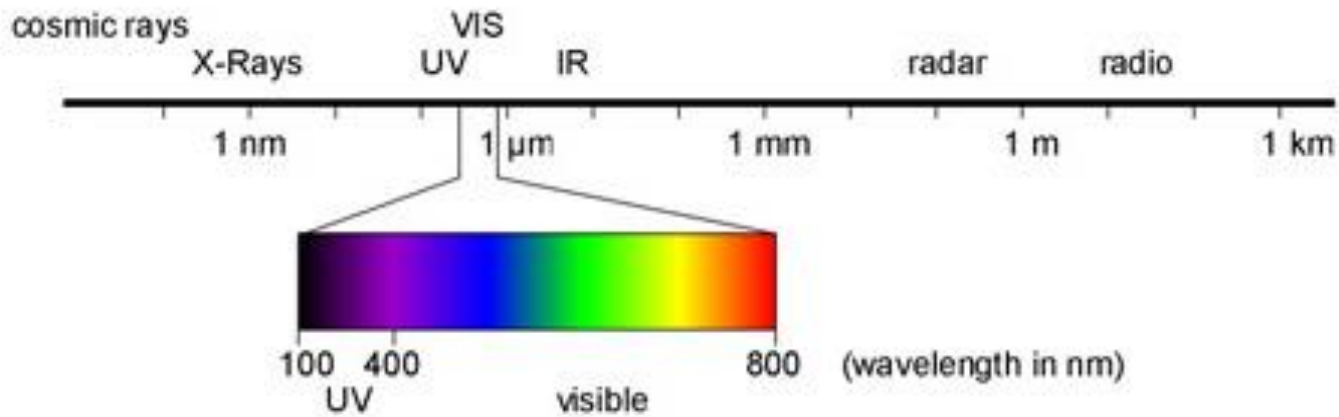
Pod pojmem **bezdrátová optická komunikace** (BOK) se rozumí komunikace pomocí optických vln šířících se v kosmickém, atmosférickém nebo vodním prostředí.

**Optický výkon** je soustředěn do jednoho nebo více optických svazků a **optická vlna** obsahuje jeden nebo několik optických kanálů dělených technikou WDM (wavelength-division multiplexing), případně dalšími technikami.

Příklad hlavice **atmosférického spoje** je ukázán na obrázcích.



# Současný stav





# Současný stav

## Typické vlastnosti laserového záření monochromaticnost a „monosměrovost“

### Modulace a kódování:

Modulace:

- intenzitní (IM)
- amplitudová (AM)
- frekvenční (FM)
- fázová (FáM)
- polarizační (PoM)

Kódování:

- linkové (NRZ, RZ, CMI, HDB3)
- transportní (EF3, NRZ, 5B6B, Manchester)
- zabezpečovací (ARQ, FEC)

Optický signál:

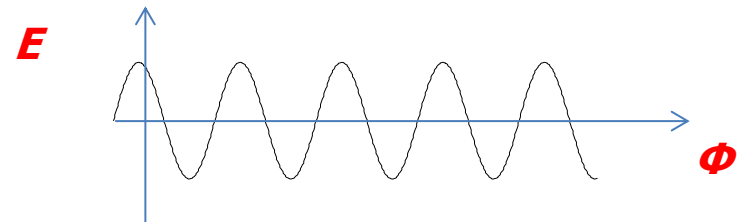
$$\vec{E} = \vec{A} \sin \Phi = \vec{A} \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta)$$

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

$$\vec{k} = k_x \cdot \vec{x}^o + k_y \cdot \vec{y}^o + k_z \cdot \vec{z}^o$$

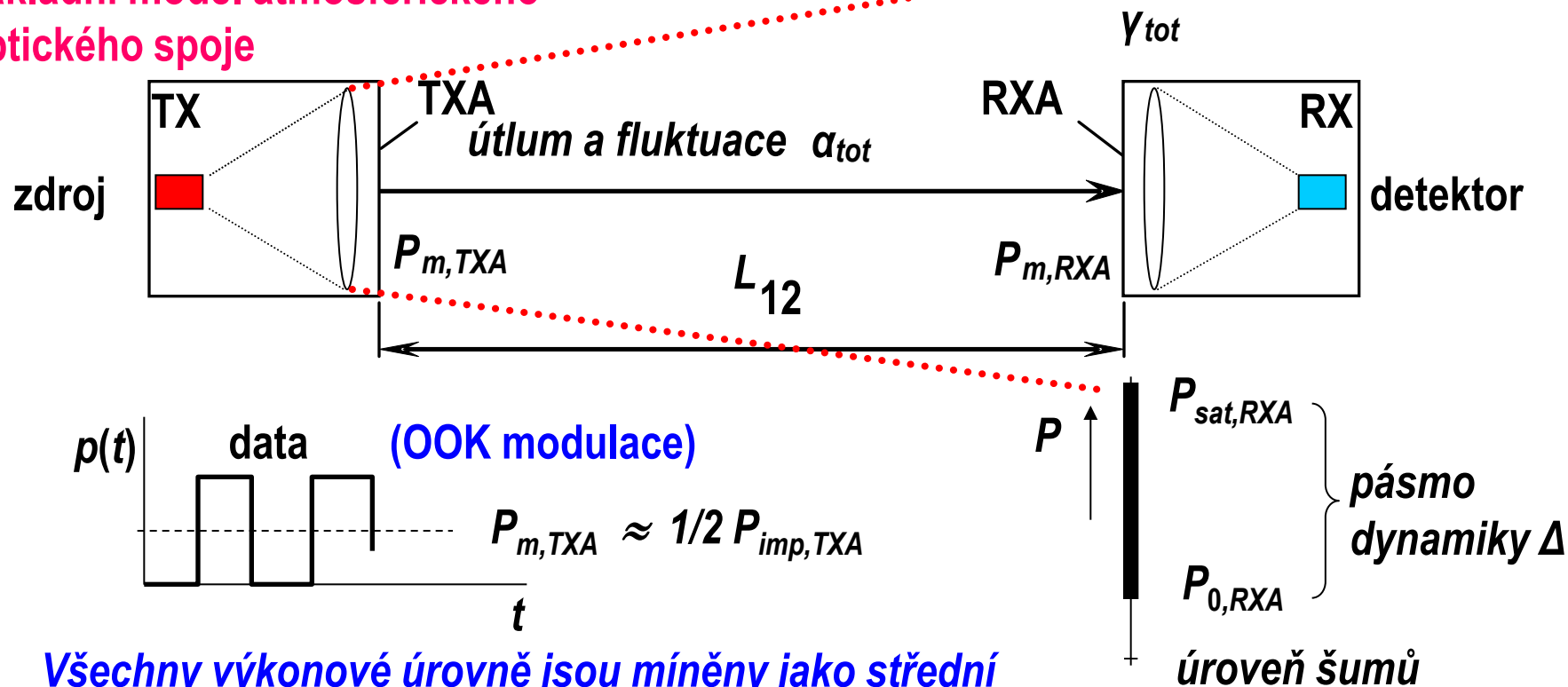
$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda_x}; k_y = \frac{2\pi}{\lambda_y}; k_z = \frac{2\pi}{\lambda_z}$$

$$\vec{r} = x \cdot \vec{x}^o + y \cdot \vec{y}^o + z \cdot \vec{z}^o$$



# Současný stav

## Základní model atmosférického optického spoje

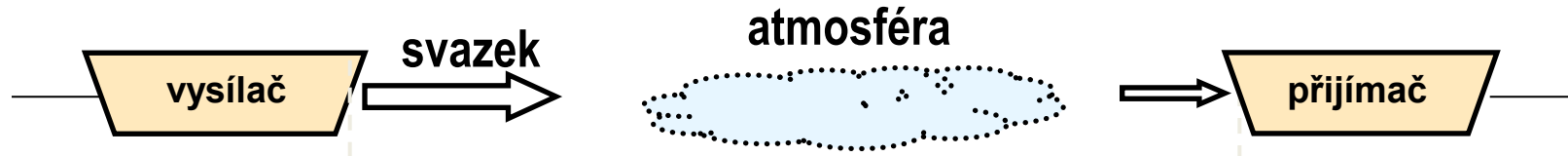


Všechny výkonové úrovně jsou míněny jako střední hodnoty.

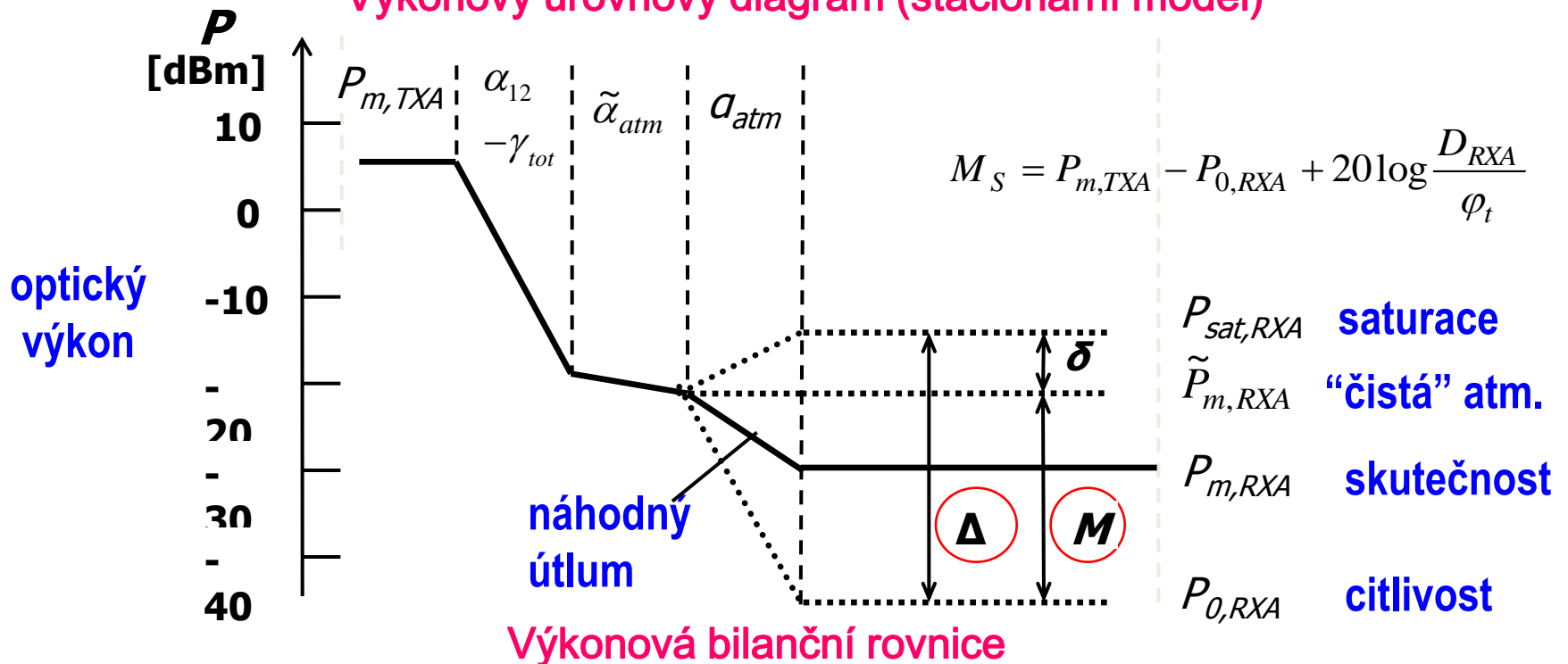
TXA - výstupní apertura vysílače;  
RXA - vstupní apertura přijímače;

$P_{m,TXA}$  - střední výkon vyzařovaný TXA;  
 $P_{m,RXA}$  - střední výkon přijímaný RXA;  
 $\alpha_{tot}$  - celkový útlum;  
 $Y_{tot}$  - celkový zisk;  
 $L_{12}$  - vzdálenost mezi TXA a RXA;

# Současný stav



Výkonový úroňový diagram (stacionární model)



$$P_{m,TXA} - a_{12} + \gamma_{tot} - \tilde{a}_{atm} - a_{atm} = P_{m,RXA}$$

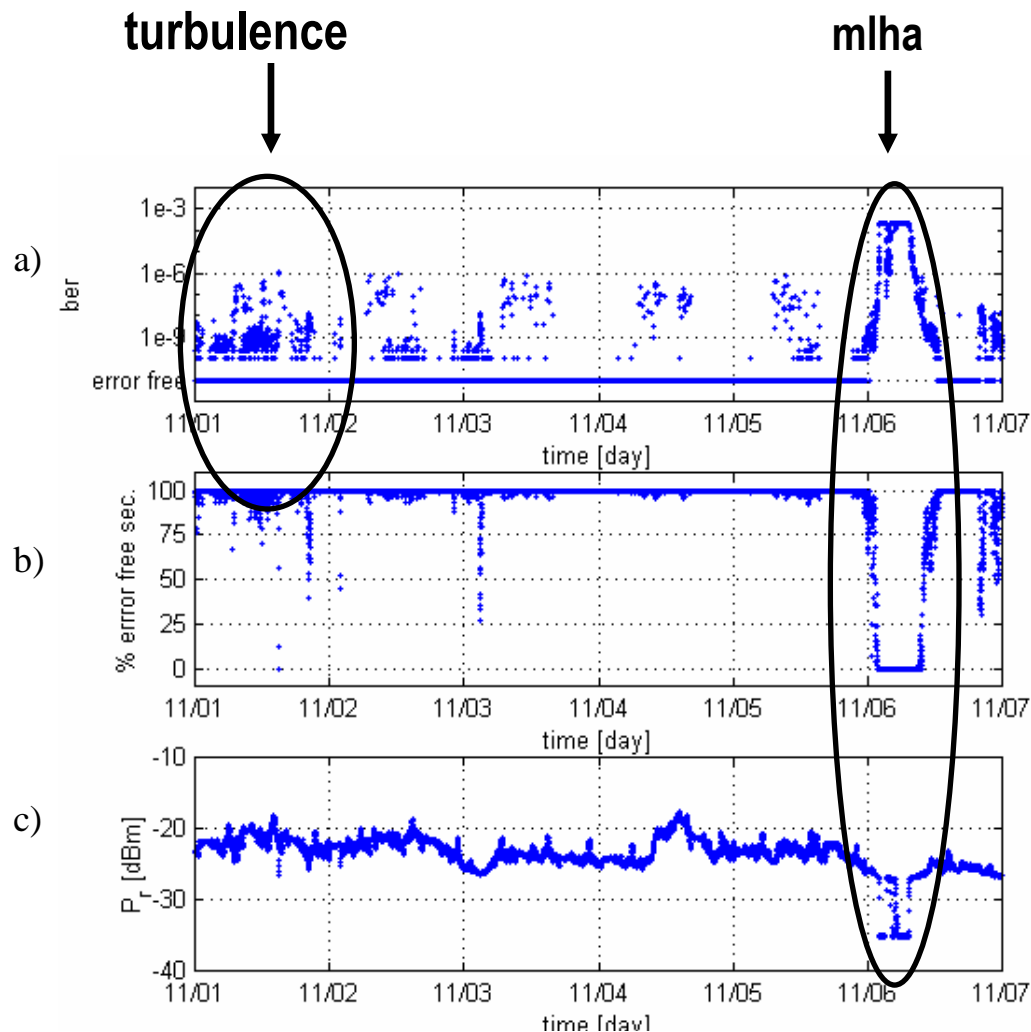
# Současný stav

**Příklad měření statistických parametrů atmosféry (statistický model zvolené lokality)**

Chybovost (BER)

% bezchybných sekund (EFS)

Přijímaný výkon ( $P_r$ )



# Současný stav

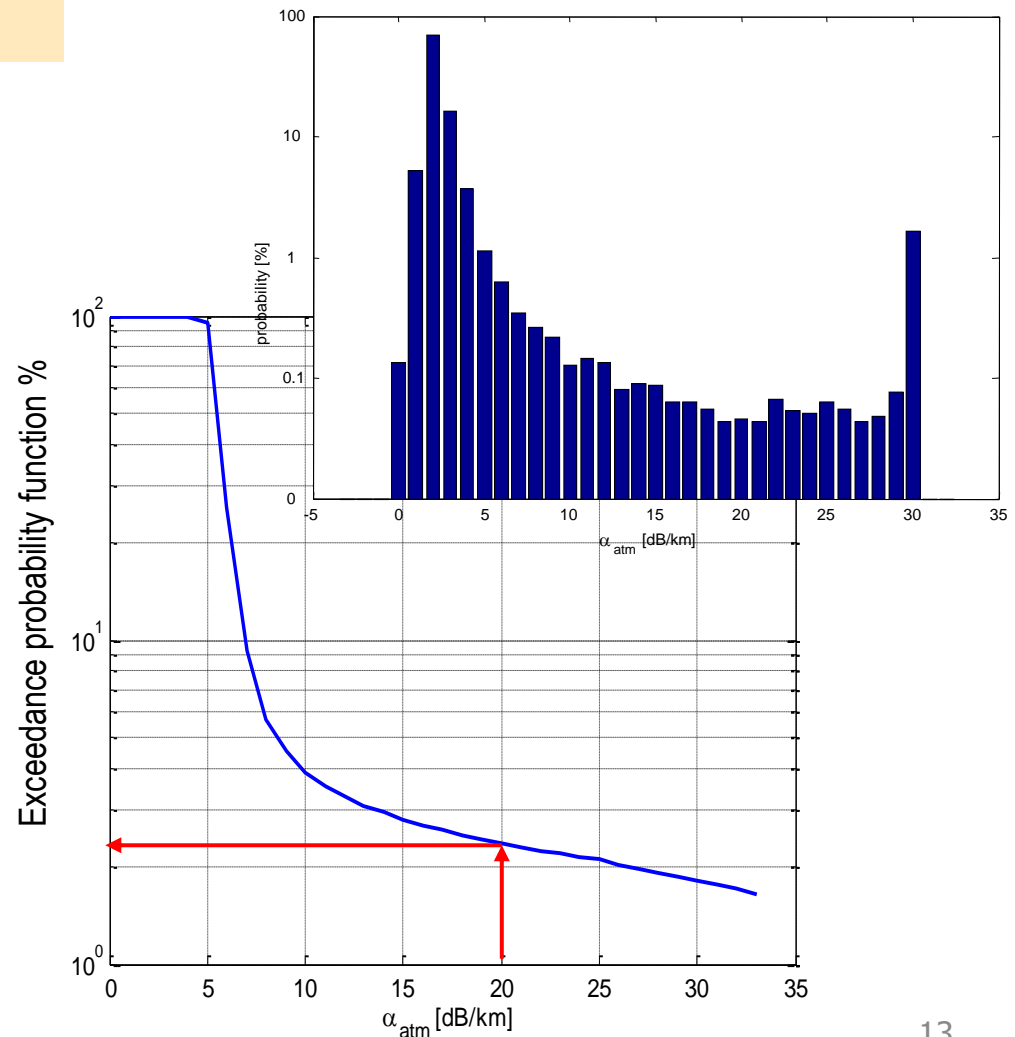
Zpracování naměřených dat –  
statistický model atmosféry ve zvolené lokalitě

PDF náhodného útlumu atmosféry  
(histogram)  
(měřeno na podzim)



Pravděpodobnost překročení určitého  
atmosférického útlumu

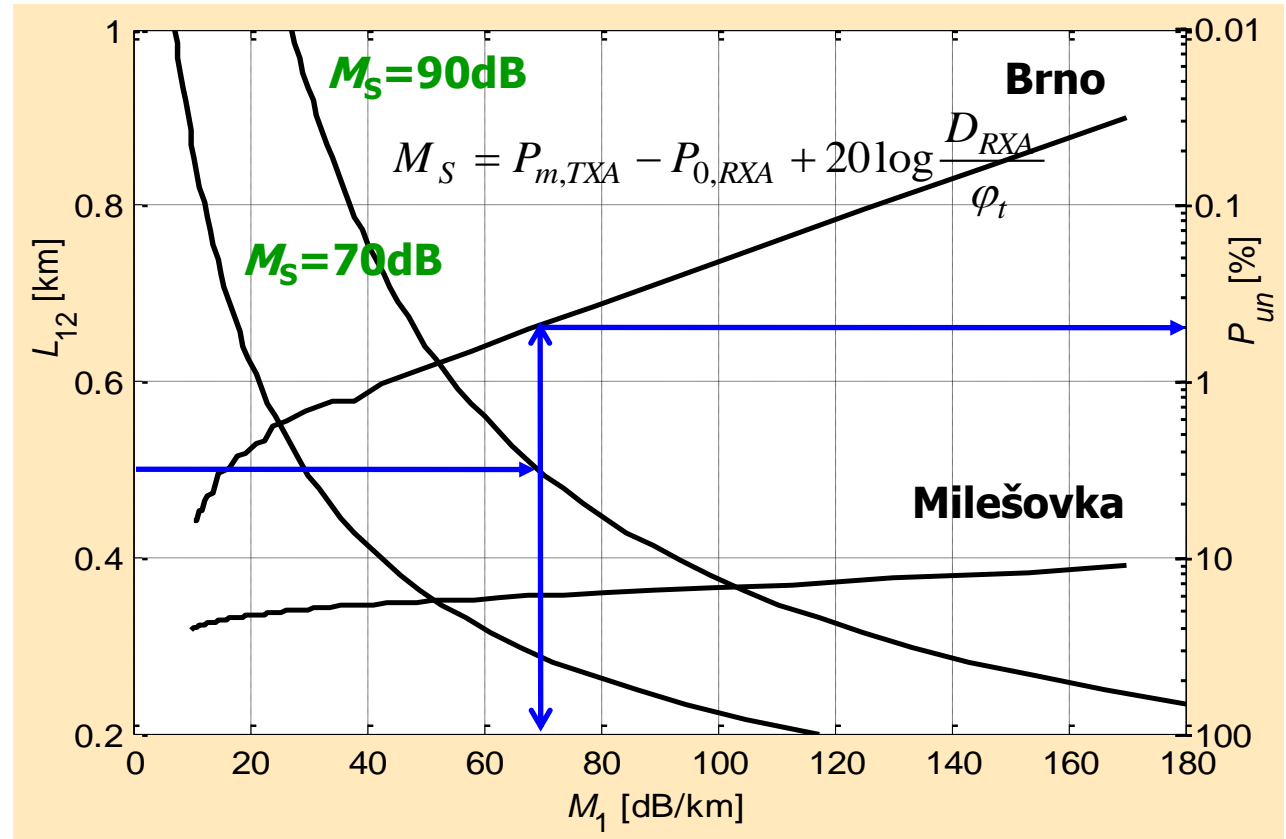
Jedná se o pravděpodobnost toho, že daný  
útlum atmosféry bude překročen





# Současný stav

## Komplexního model datového optického spoje



## Nomogram pro určení nedostupnosti spoje

$M_S$  – systémová rezerva (nezahrnuje atmosféru)

$M_1$  – normovaná rezerva spoje (zahrnuje vliv atmosféry)

# Optimální rozložení optické intenzity ve svazku

Optická vlna



Optická intenzita



Optický výkon

$$P(z, t) = \int_S I(x, y, z, t) dx dy$$

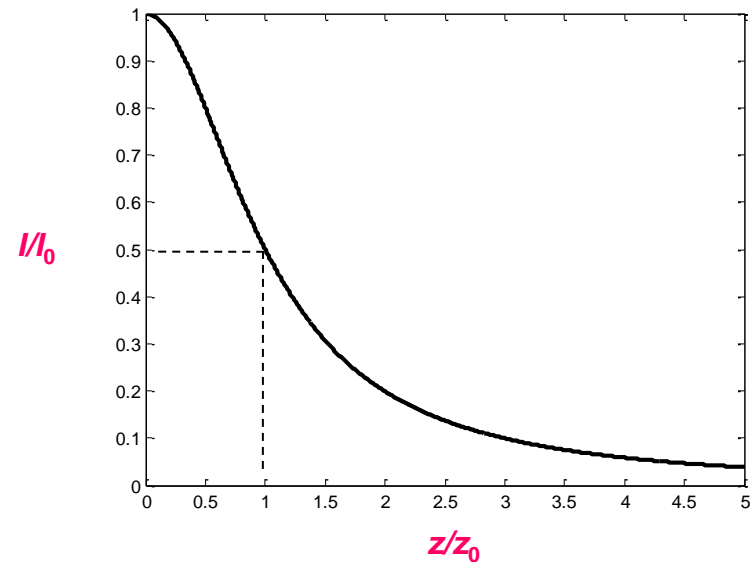
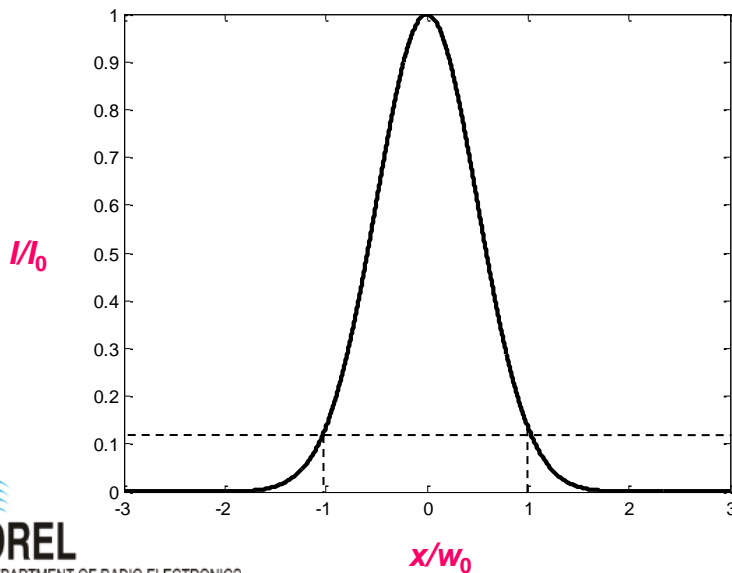
$$\left\langle \left| \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{H}(\vec{r}, t) \right| \right\rangle_{\text{time}} = I(\vec{r}) = I(x, y, z)$$

Rychlé optické změny v čase

Pomalé (modulační) změny v čase

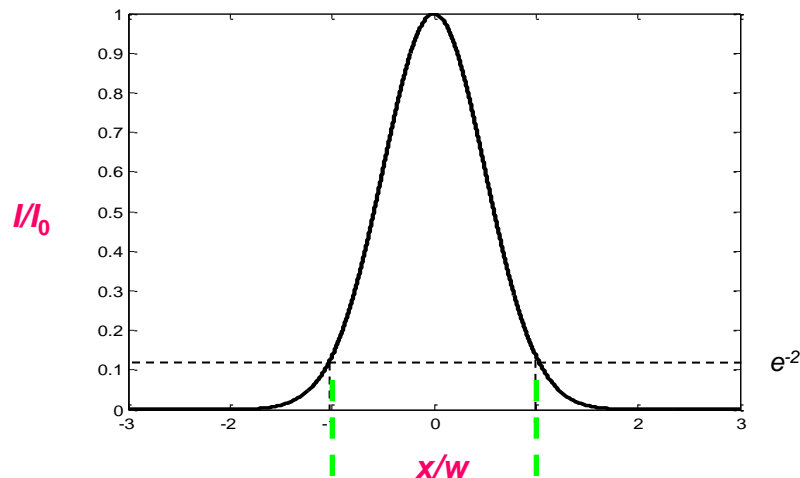
Optical intensity distribution  
in Gaussian beam

$$I(x, y, z) = I_0 \left[ \frac{w_0}{w(z)} \right]^2 e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}}$$

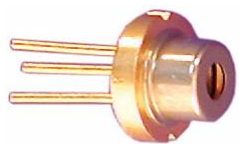


# Optimální rozložení optické intenzity ve svazku

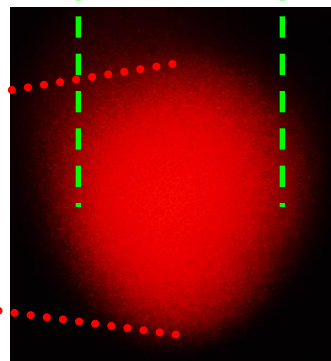
Laserový svazek



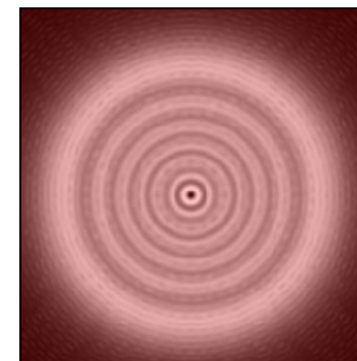
Laserová dioda



svazek



Skvrnková interference ve stopě svazku

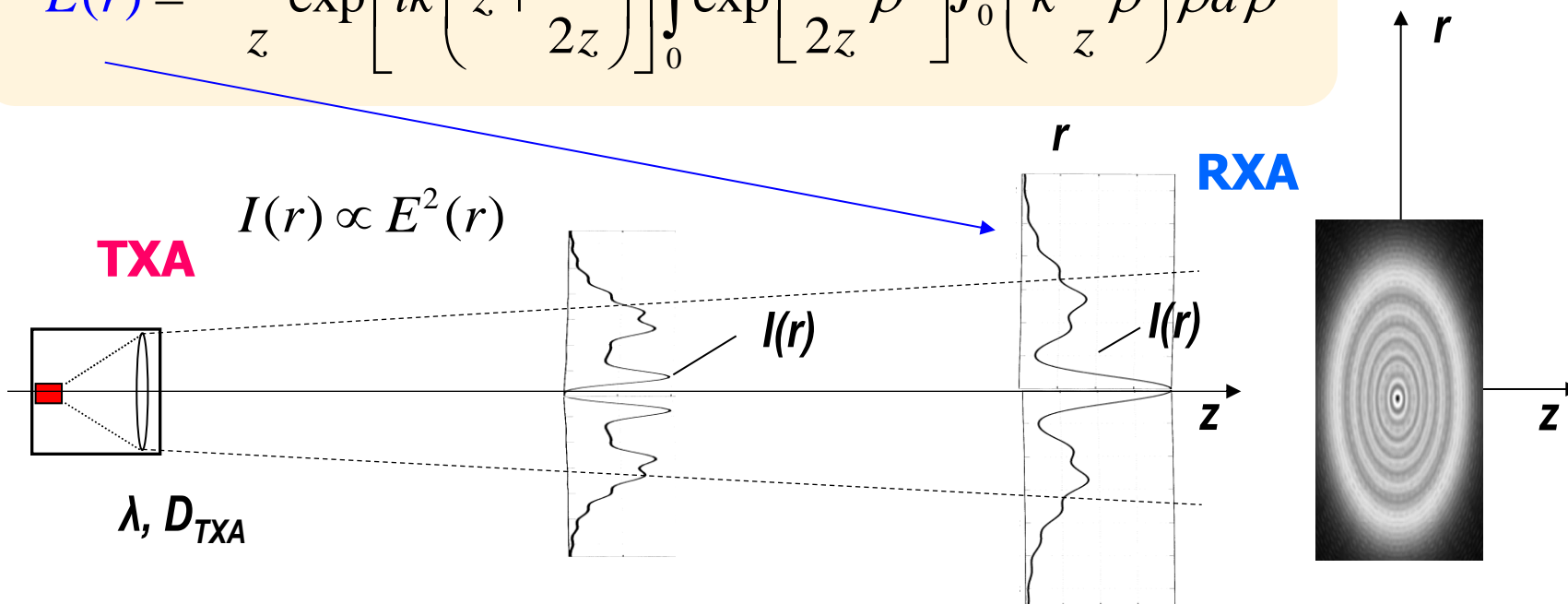


Fresnelova difrakce na objímce čočky

# Optimální rozložení optické intenzity ve svazku

## Řešení difrakčního integrálu v rovině přijímače

$$E(r) = -\frac{ik}{z} \exp\left[ ik \left( z + \frac{r^2}{2z} \right) \right] \int_0^a \exp\left[ \frac{ik}{2z} \rho^2 \right] J_0\left( k \frac{r}{z} \rho \right) \rho d\rho$$



## Rozložení optické intenzity vlivem difrakce

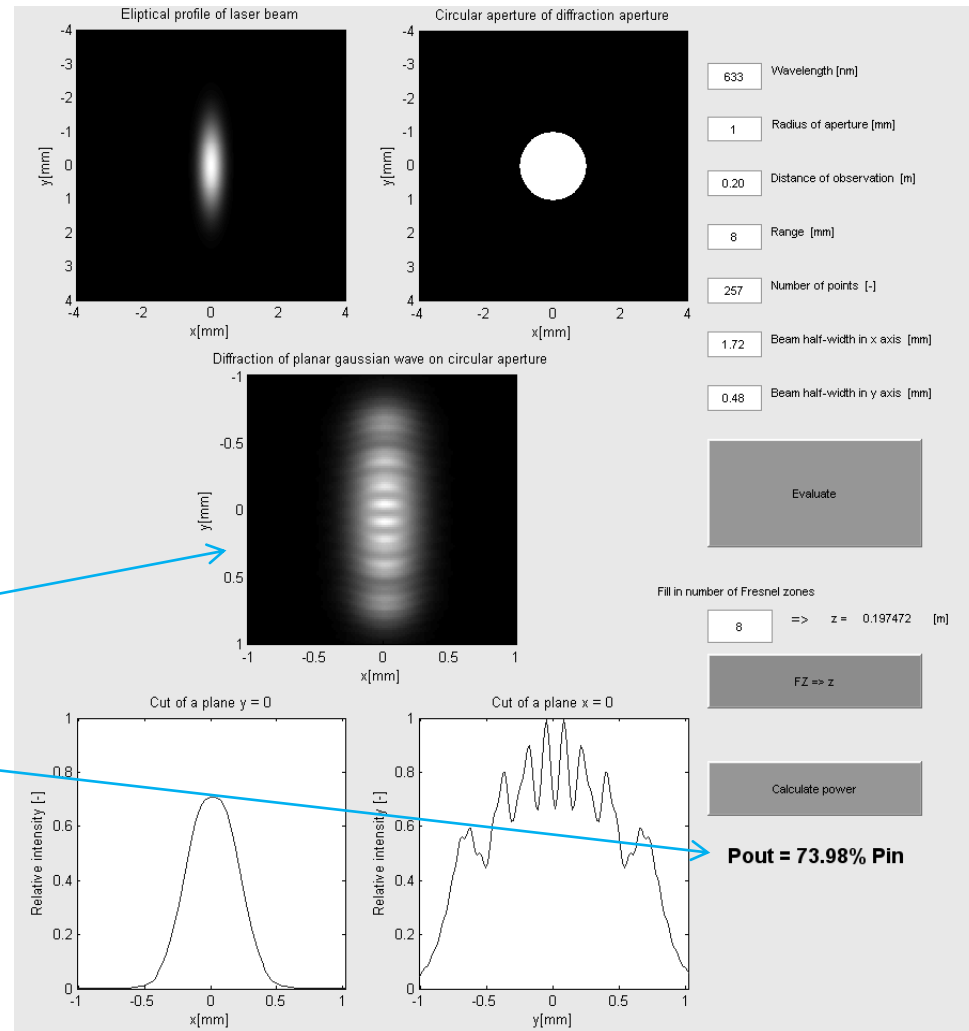
# Optimální rozložení optické intenzity ve svazku

**Difrakce ve vysílaném svazku se projeví zejména při nevhodném návrhu vysílací optické soustavy.**

- Svazek o průměru větším než je průměr vysílací apertury vykazuje **difrakci a útlum**

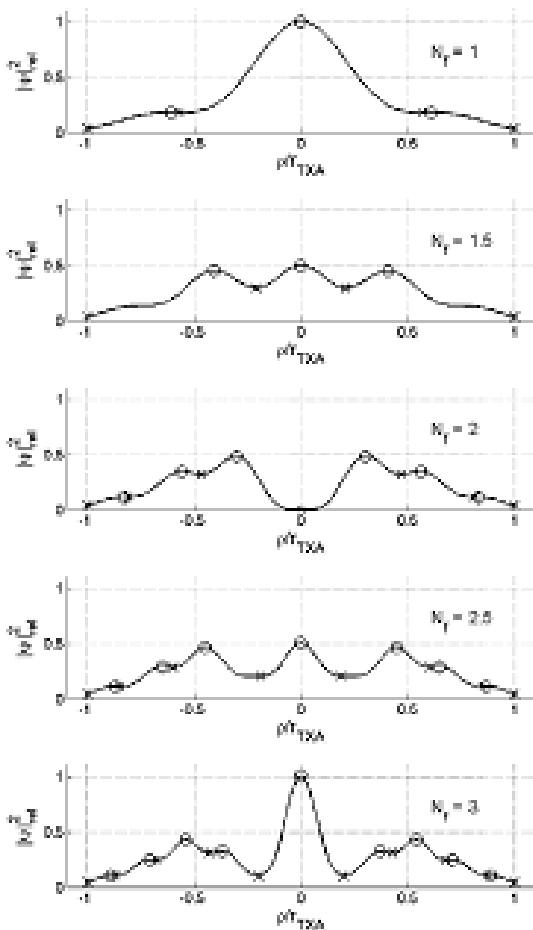
- Elipticky symetrické Gaussovy svazky procházející kruhově symetrickou vysílací aperturou a analyzují se obtížně

- Podařilo se vytvořit modely pro **difrakci** a **útlum** *divergentních astigmatických elipticky symetrických Gaussových svazků omezených kruhově symetrickou aperturou (čočkou).*



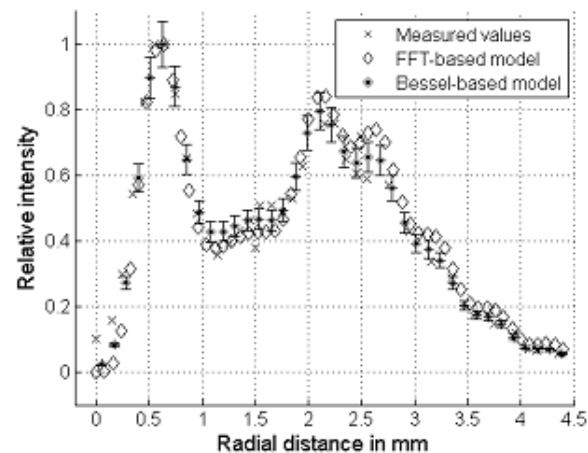
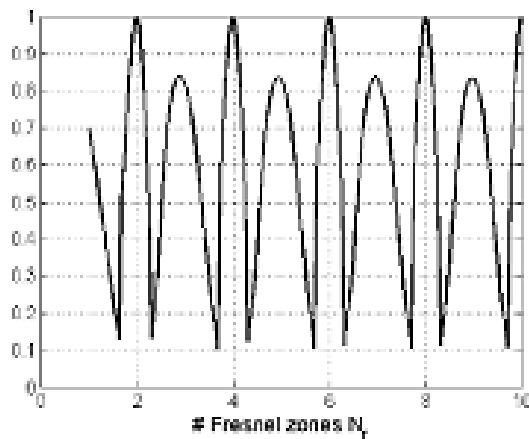


# Optimální rozložení optické intenzity ve svazku



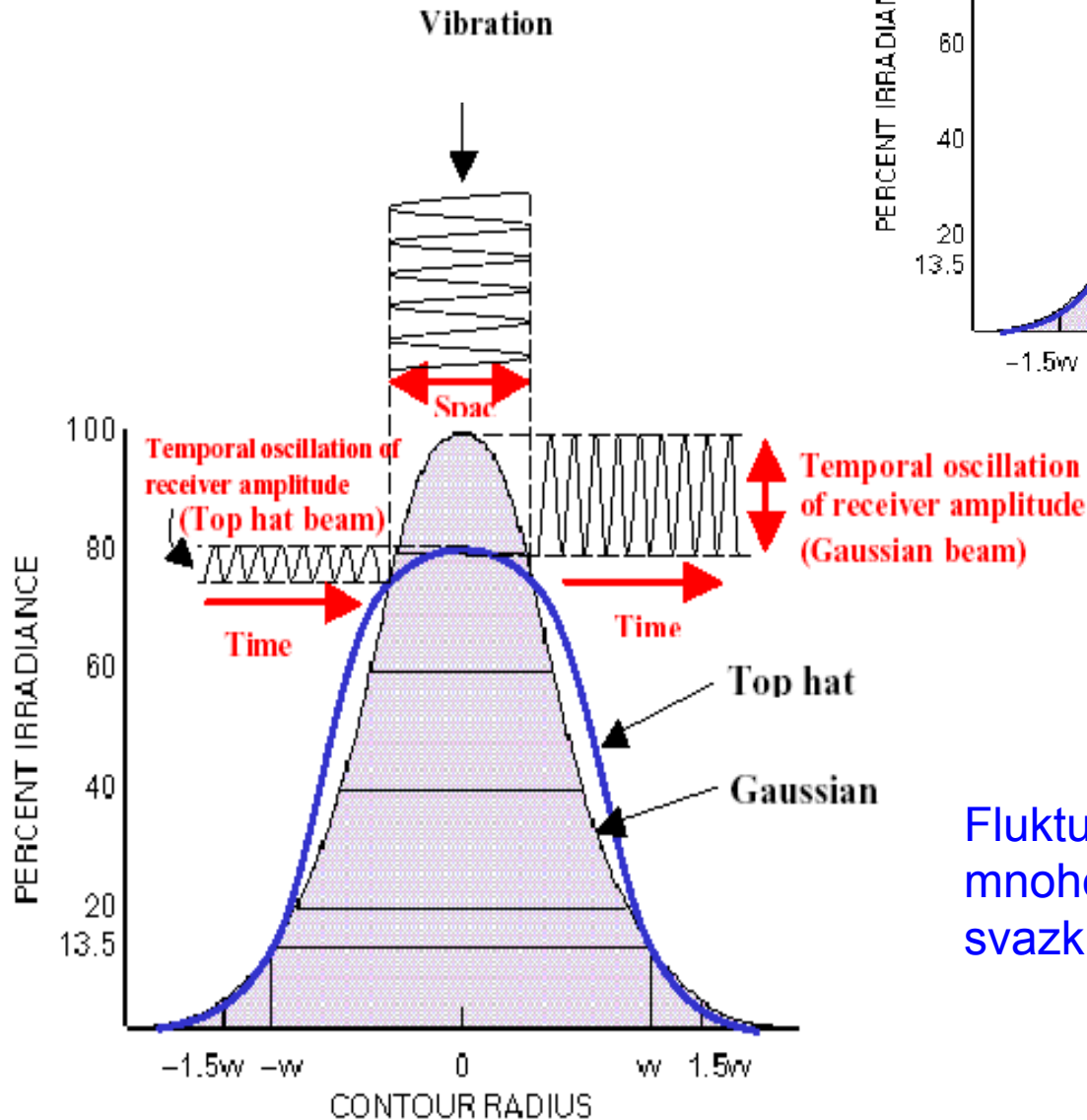
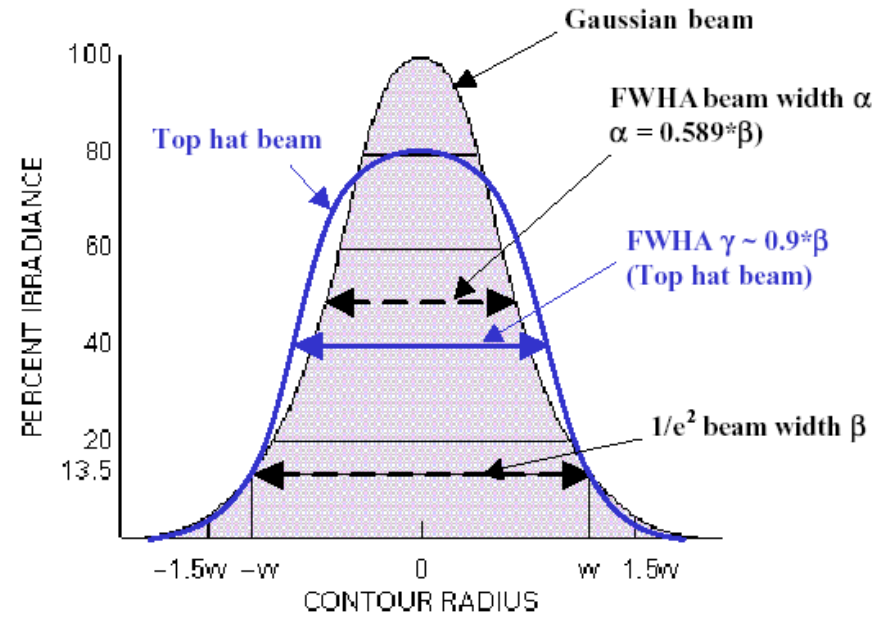
Kontrast difrakčního obrazce

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



Porovnání experimentu s modelem

# Optimální rozložení optické intenzity ve svazku



Fluktuace optického výkonu jsou mnohem menší v případě „top hat“ svazku než u Gaussova svazku

# Standardní a nestandardní atmosférické jevy

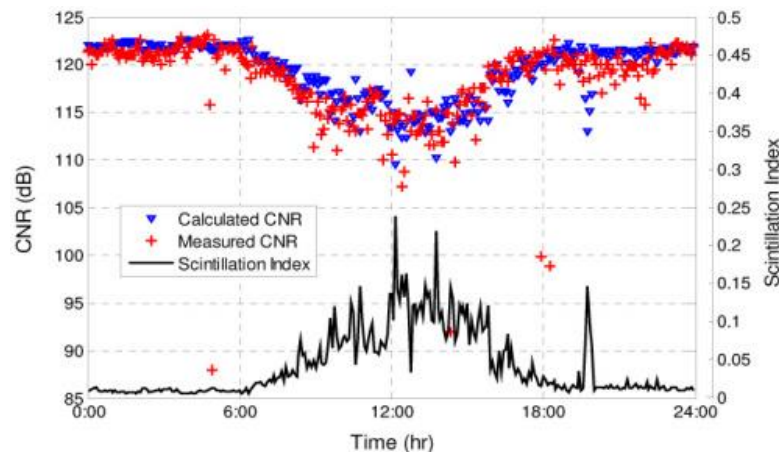
## Standardní jevy:

- Absorpce
- Rozptyl
- Refrakce
- Fluktuace indexu lomu
  - Scintilace
  - Bloudění svazku
  - Ztráta prostorové koherence

Útlum (mlha)



Fluktuace (turbulence)

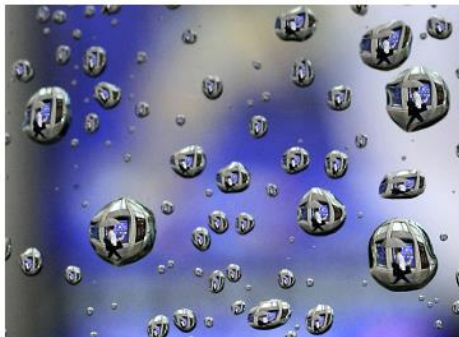


# Standardní a nestandardní atmosférické jevy

Experimentální výzkum atmosférického přenosového kanálu **vyžaduje pečlivý přístup k naměřeným datům.**

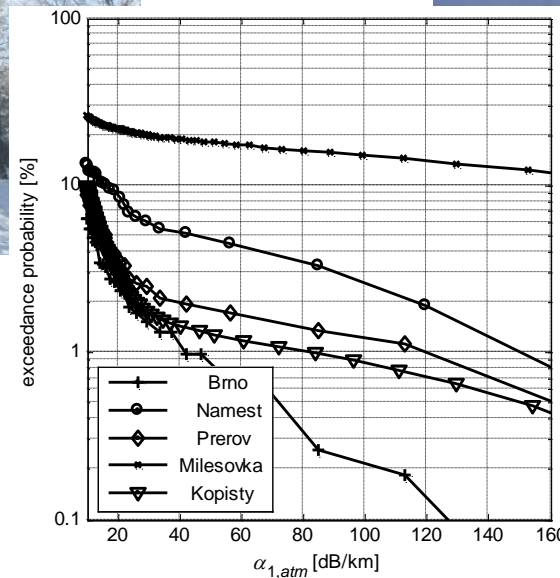
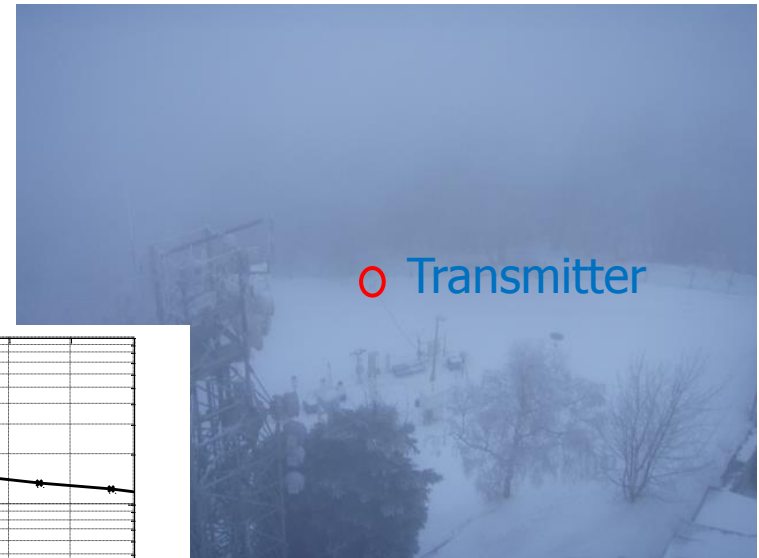
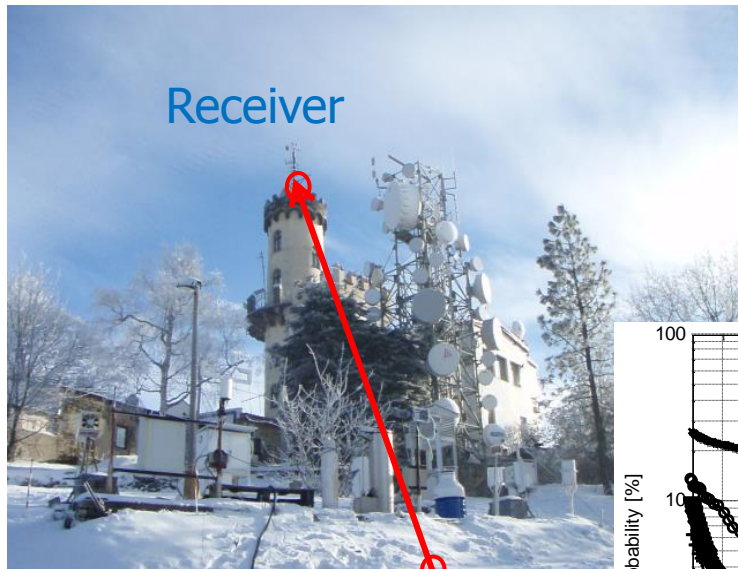
Vedle jevů, které můžeme považovat za „standardní“ (útlum a turbulence) existují tzv. „nestandardní jevy“ (podceňované)

- námraza,
- zamlžené průzory,
- kývání budov vlivem větru,
- deformování svazku vlivem difrakce,
- nehomogenity atmosférických parametrů podél trasy.



# Standardní a nestandardní atmosférické jevy

- Milešovka (Donnersberg) – lokalita s nejhorsími meteorologickými podmínkami v ČR
- Vysoká pravděpodobnost výskytu nízkých oblaků, deště, mlhy atd.



- Statistický model pro určení dostupnosti spoje



# Standardní a nestandardní atmosférické jevy

## Aplikace citlivé na jevy v časové oblasti:

- Širokopásmové spoje (100Gbs +)
- Distribuce referenčního signálu (optické frekvence atd.)

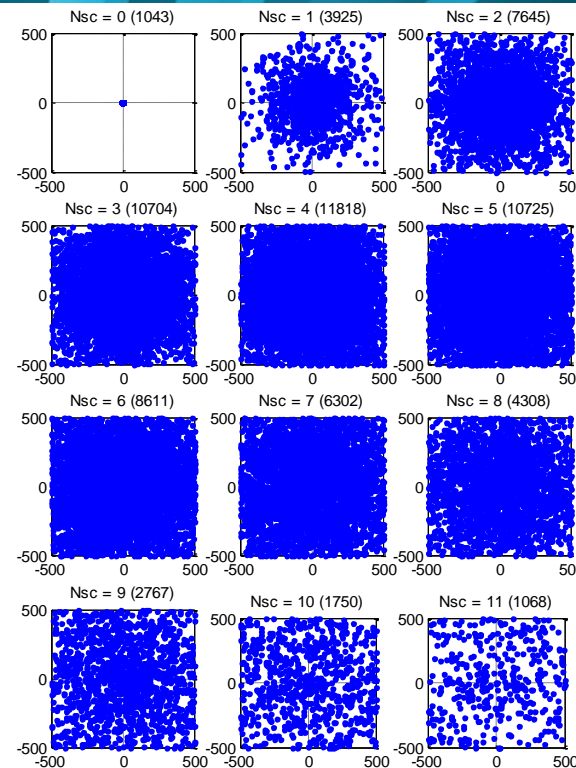
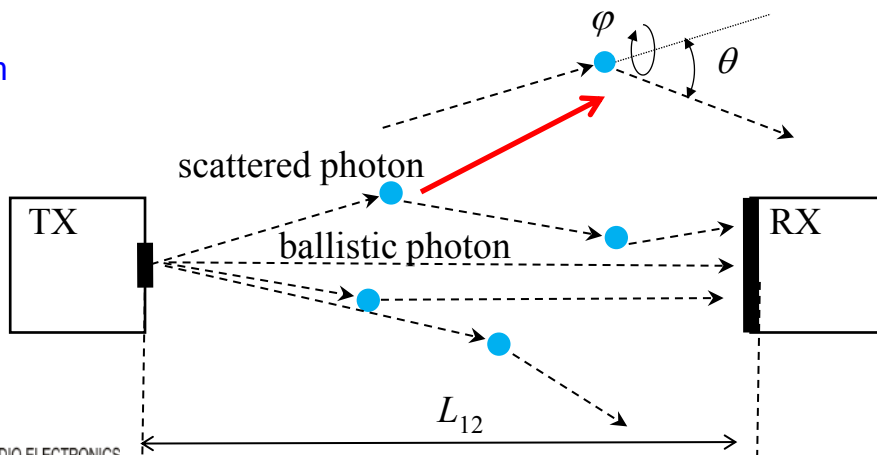
Potřebné je zkoumat vliv mlhy na (časovou) disperzi kanálu

- **Monte-Carlo „ray-tracing“ simulace**
- **Je připravován experiment na Milešovce**

## MCRT simulace implementovaná v Matlabu

- Dense-sampled Mie phase function (1 million samples)
- Simulační rychlost: 1 mil. photons / 30 seconds (Core i7)

0,1ns ... 3cm



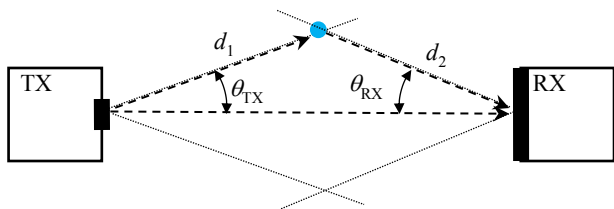
Počet rozptýlených fotonů v rovině přijímače v závislosti na úrovni mlhy  
 Dosah  $L_{12} = 1\text{km}$

Počet vyslaných fotonů: 1 000 000 (1000x1000m square).

$\theta_{TX} = 1.5\text{ mrad}$ ,  $\theta_{RX} = 20\text{ mrad}$ ,  
 $D_{RXA} = 0.2\text{ m}$ .

# Standardní a nestandardní atmosférické jevy

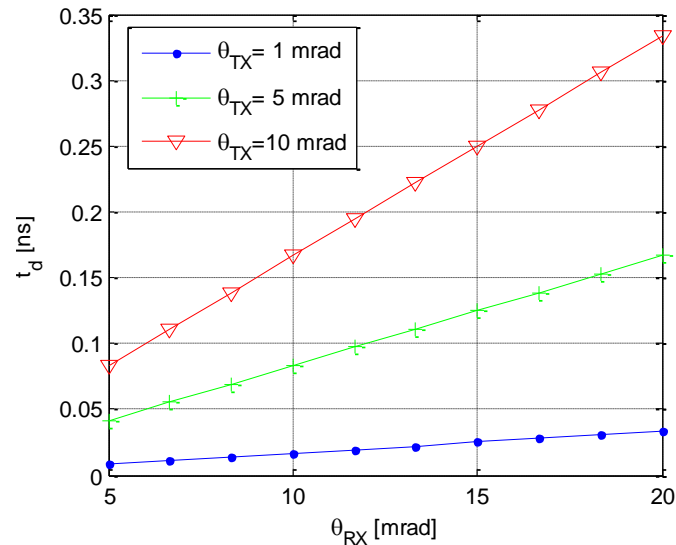
## Geometrický model



Nejhorší situace z hlediska disperze, která při rozptylu nastává (single-scattering aproximace).

## Je připravován experiment

- Výkonový laditelný pulsní laser
- $\lambda = 420 - 2100 \text{ nm}$
- Výstupní energie: 100 mJ
- Doba trvání impulsu: 3-5 ns
- Opakovací frekvence: 10 Hz

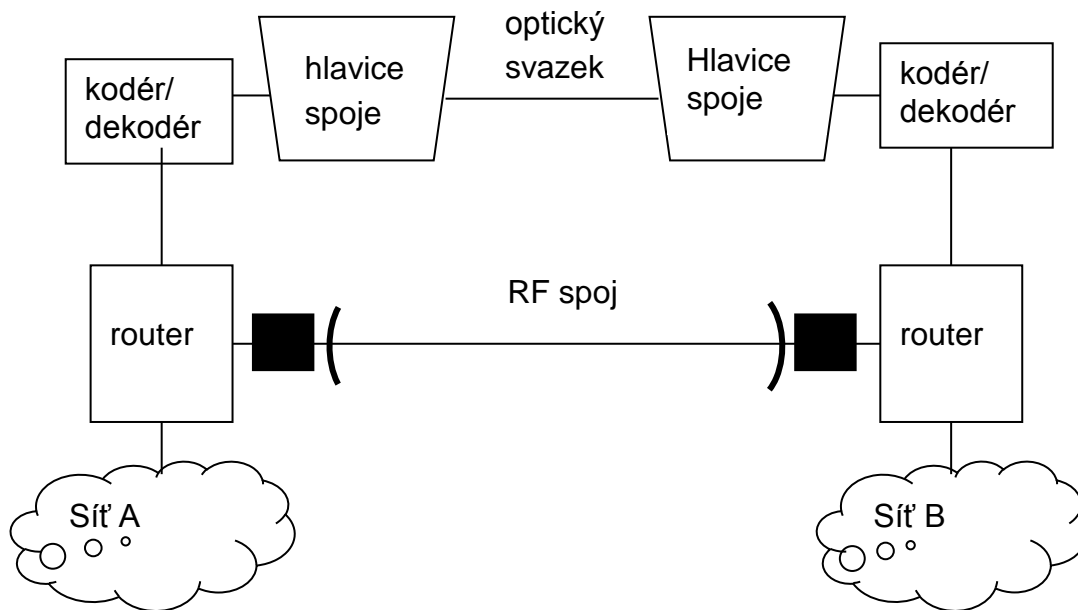


Závislost největšího časového rozdílu dopadajících (rozptýlených a balistických) fotonů na zorném úhlu přijímače při „single-scattering“ aproximaci ( $L_{12} = 1\text{km}$ ).



# Nové trendy a aplikace

**Hybridní spoj** pracuje s dvěma kanály optickým a radiovým.  
(Dostupnost spoje dosahuje hodnoty 99,999%)



# Nové trendy a aplikace

## Výhody hybridních spojů oproti jednokanálovým spojům byly popsány v mnoha studiích.

Od budoucích **RF systémů** se očekává přenosová rychlost větší než 10 Gbps a frekvence nosné RF linky větší než 100 GHz.

Budoucí výzkum na pracovišti VUT v Brně

- je zaměřen na **archivaci experimentálních dat**
- a **analýzu přijatého výkonu za přítomnosti různých kombinovaných srážkových jevů** (mlha + sníh, mlha + déšť, atd.)

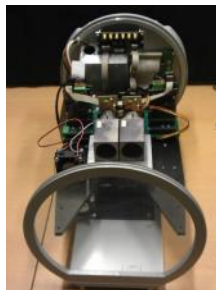
**Byl vyvinut hybridní testovací systém s vysokým pásmem dynamiky (50dB@750m). Spoj pracuje se**

- dvěma kanály (850nm a 1550 nm) v optickém pásmu
- a jedním kanálem 122 GHz v RF pásmu (pásmo významné pro dosažení přenosové rychlosti 10 Gbps)

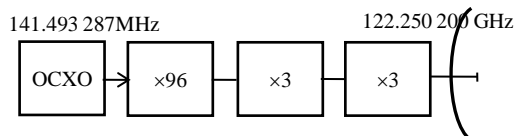
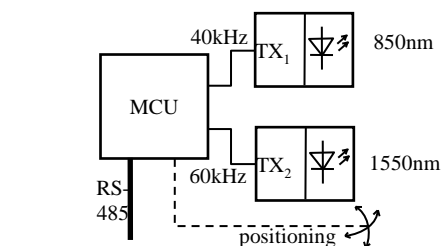


# Nové trendy a aplikace

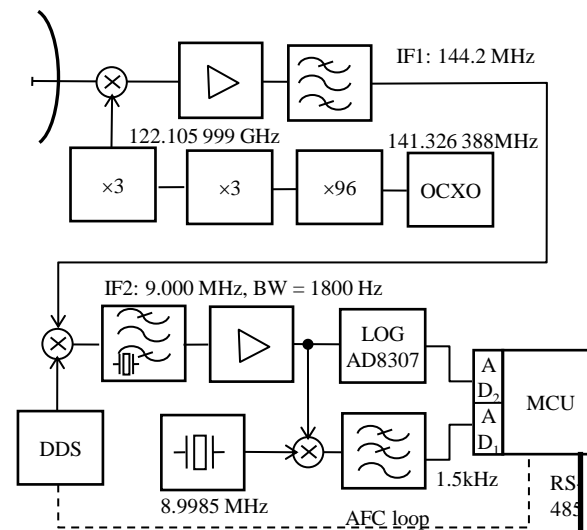
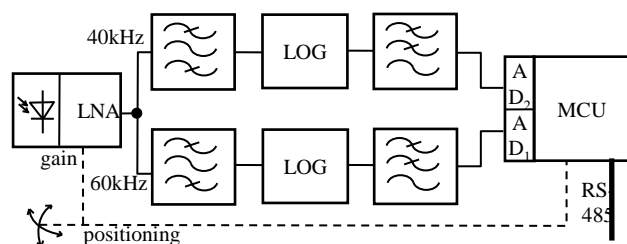
Parameter	Channel 1	Channel 2
Wavelength $\lambda$	845 nm	1550 nm
Mean output power	5 mW	5 mW
Beam divergence $\phi_t$	4 mrad	4 mrad
Modulation frequency	40 kHz	60 kHz
<b>Photodiode</b>	<b>InGaAs PIN FGA 21</b>	
Receiver lens diameter	200 mm	
Bandwidth	5 kHz	
Sampling rate	up to 10 kHz	
Receiver sensitivity	-65 dBm	
<b>Dynamic range</b>	<b>50 dB<sub>optical</sub></b>	
Link margin on 750m path	48 dB	



Parameter	Value
<b>Frequency</b>	<b>122.250 GHz</b>
Output power at antenna flange	-1.55 dBm
EIRP	38.5 dBm
TX antenna gain	40 dB
RX antenna gain	40 dB
Bandwidth	1.8 kHz
Sampling rate (at LOG output)	up to 10 kHz
Receiver sensitivity	-105 dBm
<b>Dynamical range</b>	<b>&gt;50 dB</b>
Link margin on 750m path	>50 dB

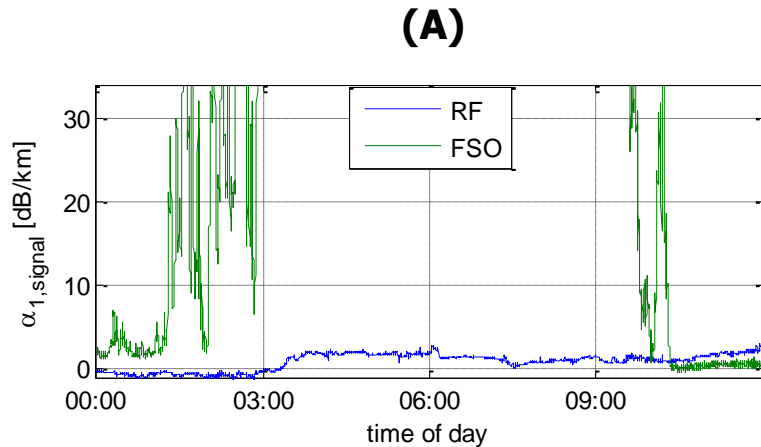


## Blokové diagramy



(Pro příjem obou optických kanálů byla použita jediná fotodioda.)

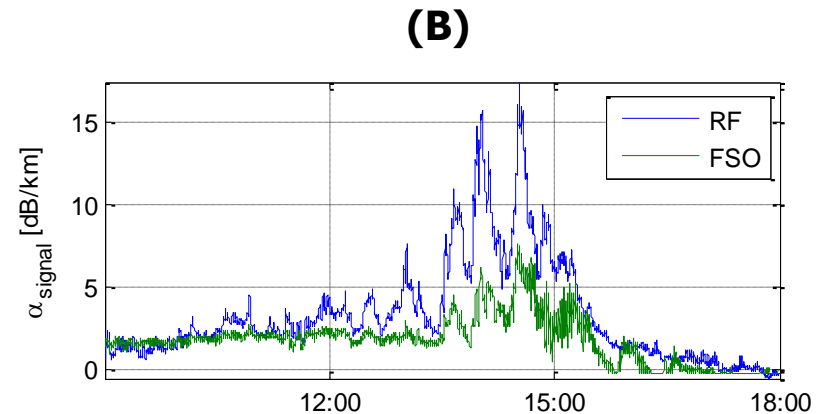
# Nové trendy a aplikace



## A) Měření útlumu v mlze:

Na grafu je prezentován útlum signálu na RF a opt. kanálu. Pro názornost je ukázán průběh pouze pro signál na 1550 nm. RF kanál odolává mlze více než opt. kanál.

Pro kontrolu byla měřena meteorologická viditelnost pomocí zařízení PWD 22. (Problém nehomogenity mlhy podél trasy.)



## B) Měření útlumu deštěm:

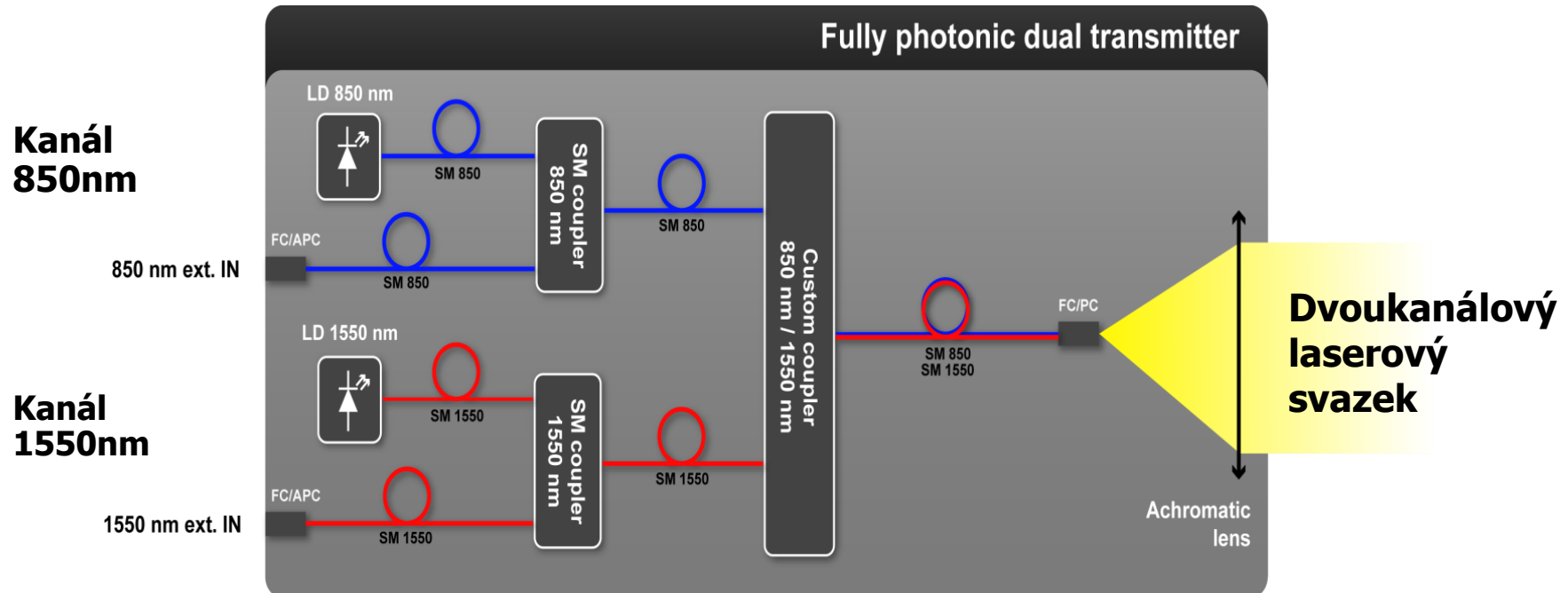
**a)** V *první polovině* grafu byl zaznamenán útlum stacionárního deště (výsledky jsou v relativně dobré shodě mezi modelem a měřeními).

**β)** V *druhé polovině* grafu se jednalo o déšť, jehož intenzita se rychle měnila. (Problém průměrování.)



# Nové trendy a aplikace

## Plně fotonická koncepce spoje (vysílač)

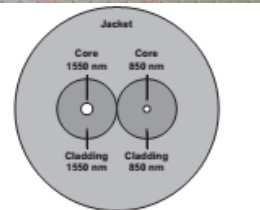
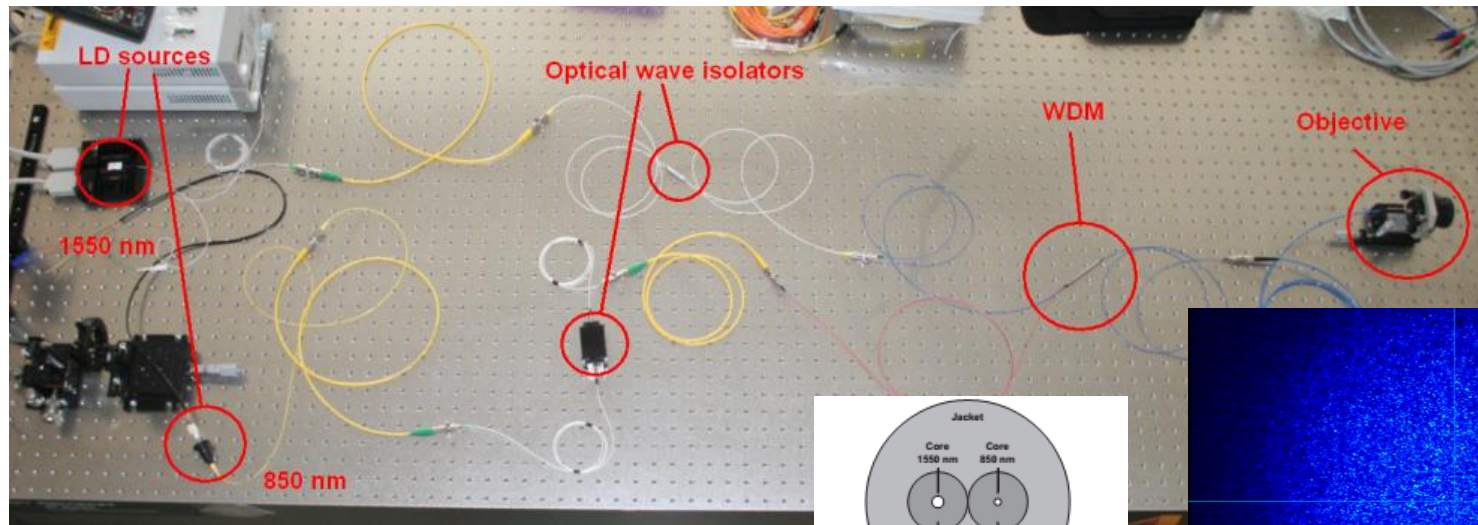


**Diagram ukazuje základní funkci fotonického vysílače:**

- 1) Vytvoření několika optických kanálů pro testování atmosférických přenosů na několika optických nosných
- 2) Sloučení těchto kanálů do jednoho optického svazku
- 3) Vytvoření Top-Hat svazku pomocí multimodového vysílacího vlákna

# Nové trendy a aplikace

Ukázka optického stolu s rozloženými prvky plně fotonického vysílače (použity jsou **dva lasery** pracující na různých vlnových délkách)

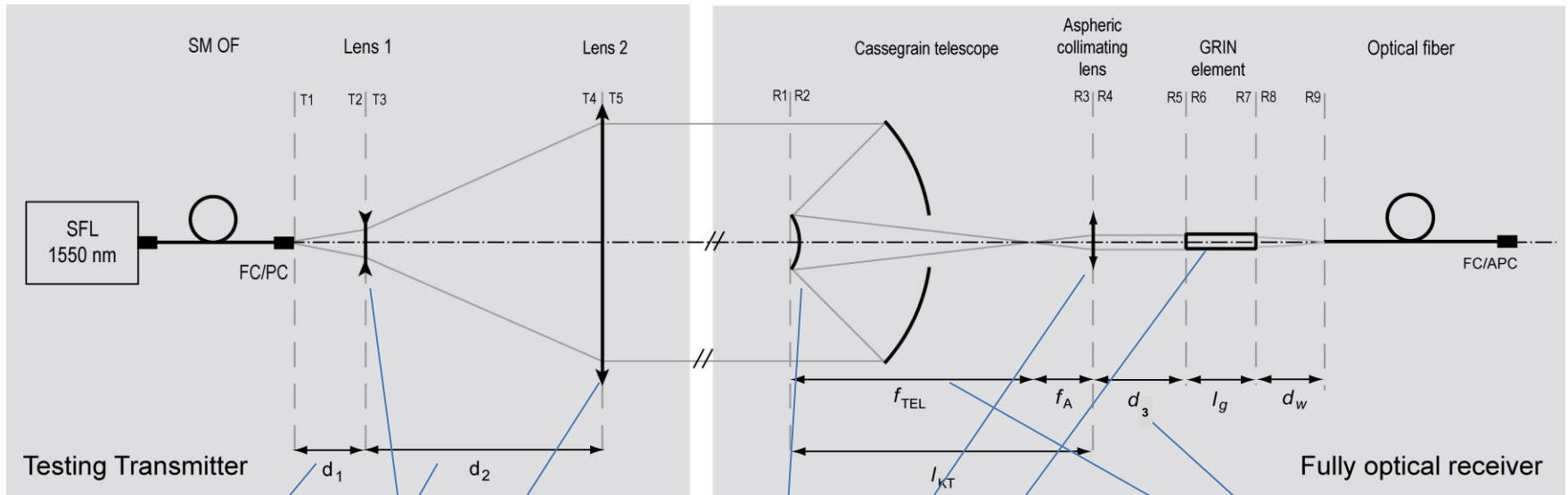


- Nevýhody standardní optoelektronické technologi
- Řešení: **fotonický vysílač**
- MM finální vlákno emituje vysoký počet modů

Větší počet modů vytváří rozložení optické intenzity blízké tzv. **“top-hat” rozložení** – které je více odolné atmosférické turbulenci než Gaussův svazek

# Nové trendy a aplikace

## Návrh celého spoje (vysílače a přijímače) pomocí maticové optiky



$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{34} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{1'2'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_{tel} & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{2'3'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_A & 1 \end{bmatrix}$$

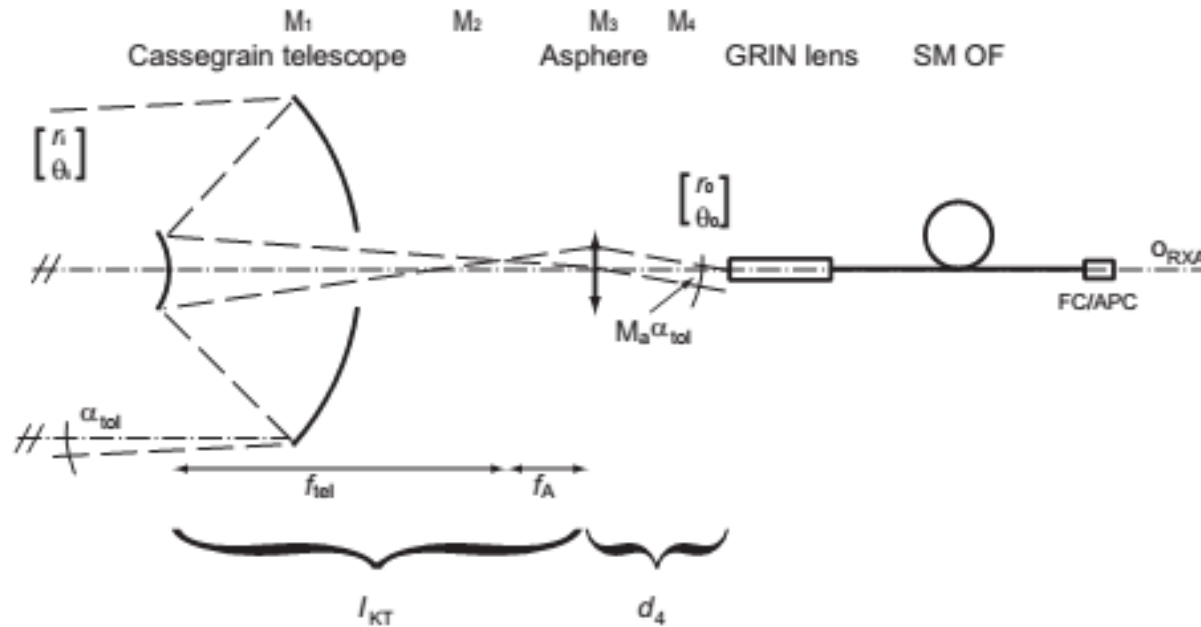
$$M_{5'6'} = \begin{bmatrix} \cos(g l_g) & \frac{1}{g n_g} \sin(g l_g) \\ g n_g \sin(g l_g) & \cos(g l_g) \end{bmatrix}$$

$$M_{1'2'} = \begin{bmatrix} 1 & f_{tel} + f_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{3'4'} = \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Nové trendy a aplikace

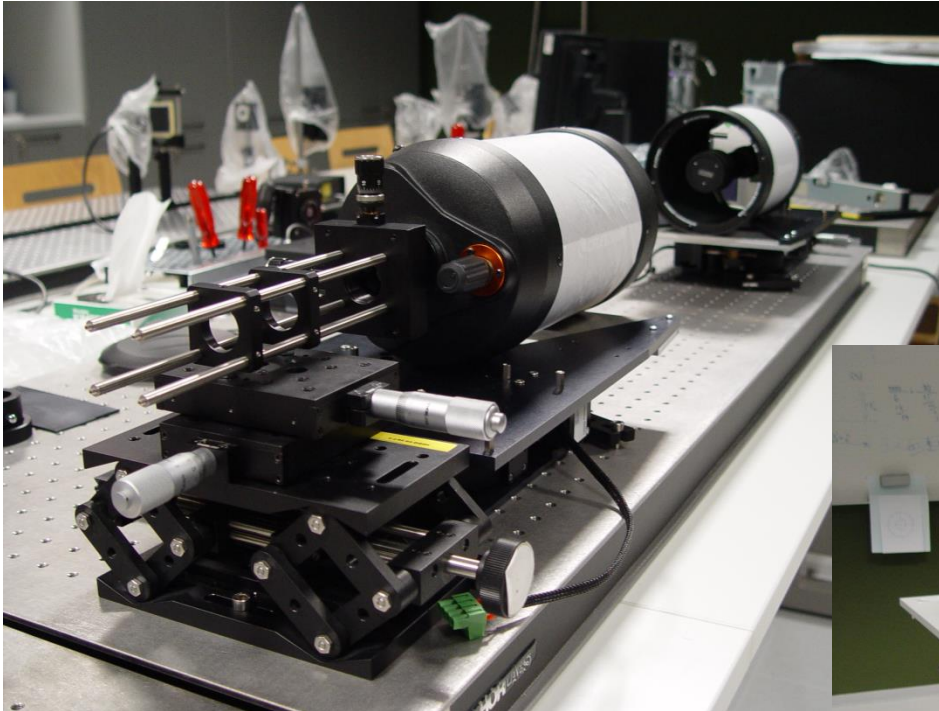
Maticový model umožňuje vypočítat úhlové fluktuace svazku (fluktuace úhlu dopadu) na vazebním vláknovém prvku způsobené turbulencí a refrakcí atmosféry.



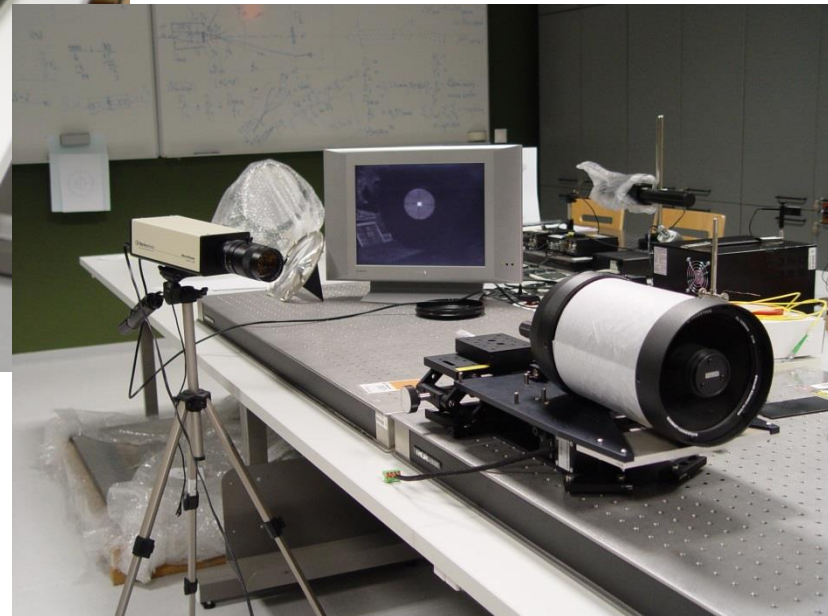
$$\begin{bmatrix} r_o \\ \theta_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_4 \left( \frac{f_A + f_{tel}}{f_A f_{tel}} - \frac{1}{f_A} - \frac{1}{f_{tel}} \right) - \frac{f_A}{f_{tel}} & \frac{f_{tel}}{f_A} d_4 + f_A + f_{tel} \\ 0 & -\frac{f_{tel}}{f_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \\ \theta_i \end{bmatrix}.$$



# Nové trendy a aplikace



Ukázka z nastavování přijímací optické soustavy plně fotonického spoje v laboratoři.



# Nové trendy a aplikace

Jednou ze zajímavých oblastí BOK jsou spoje pracující s technikou „kvantové distribuce klíče“ (QKD) (**optická kryptografie**)

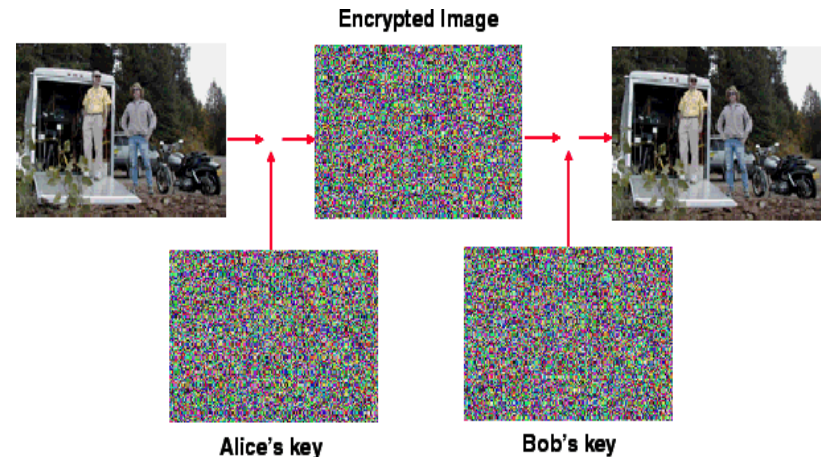
Implementace (vlákno):

1 Mbit/s na vzdálenost 20km

10 kbit/s na vzdálenost 100km

V roce 2008 byla ve Vídni během tiskové konference prezentována kvantová síť SECOQC.

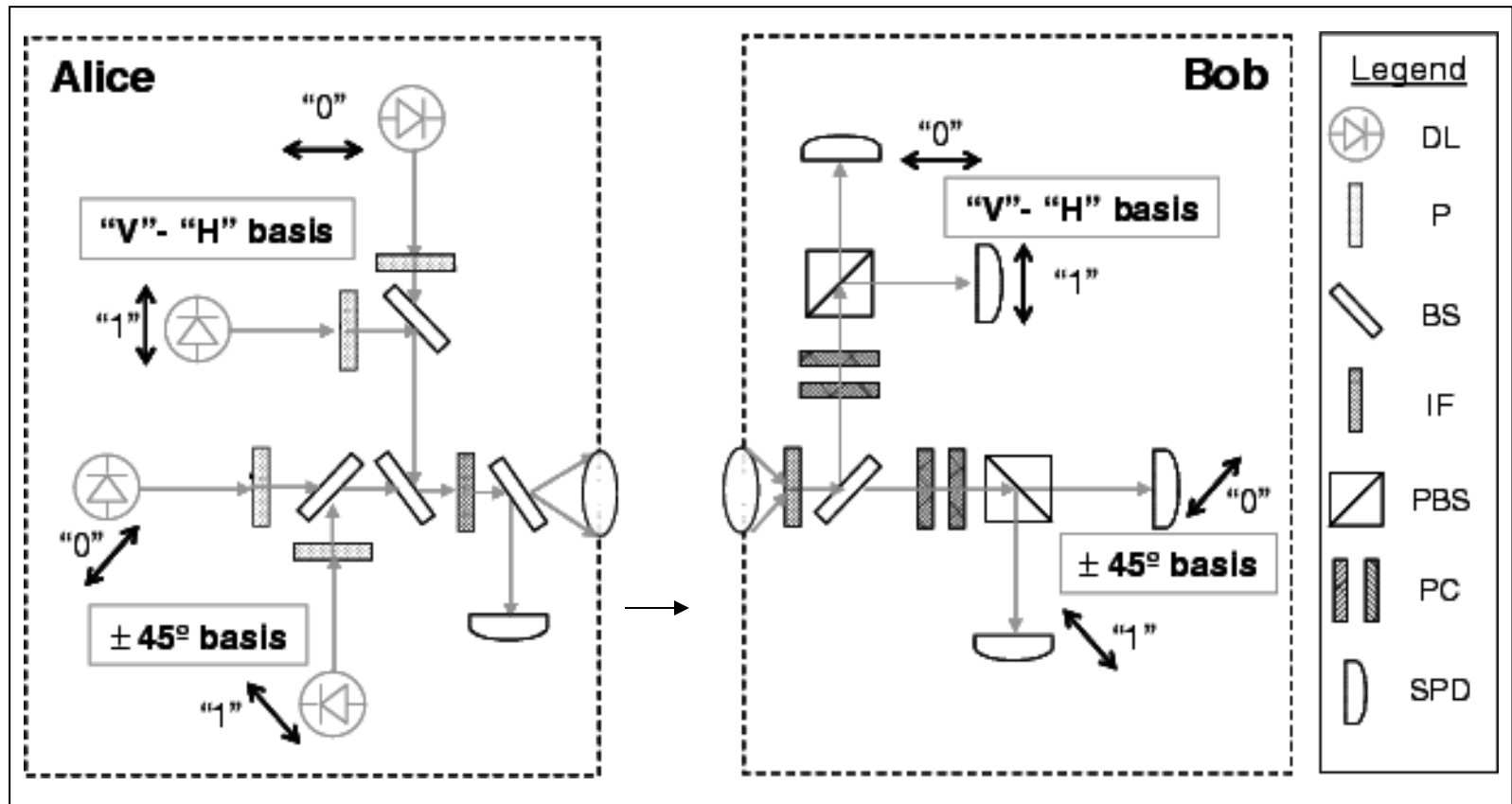
Současnost: Probíhá vývoj kvantového Internetu a přenos kvantové distribuce klíče pomocí satelitů.



První prezentace OBS pracujícího technikou QKD byla uveřejněna již 12. července 2002 v New Journal of Physics. Autoři publikace jsou z „Los Alamos National Laboratory“.



# Nové trendy a aplikace



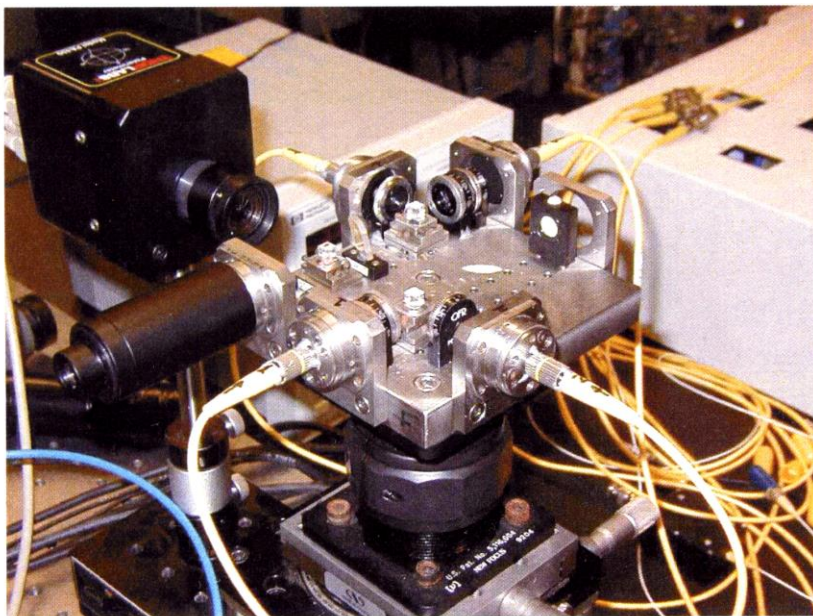
# QKD proces

## Časové intervaly (1 až 11)

<b>Alice posílá</b> Bobovi v daných čas. intervalech posloupnost <b>náhodných</b> bitů (0;1), <b>náhodně</b> kódovaných jako lineárně polarizované fotony buď v přímé “+” nebo diagonální “x” bázi.	báze	x	+	x	+	+	+	x	x	x	+	+
	bity	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
V určitých časových intervalech <b>Bob přijímá</b> fotony ( <b>bity</b> ) ve „svých“ <b>náhodných</b> polarizačních bázích.	báze	+	+	+	x	x	+	x	+	x	+	+
	bity	0	1	-	1	-	1	0	-	1	0	1
<b>Bob informuje klas. spojem Alici</b> , ve kterých časových intervalech <b>detekoval</b> fotony; Alice <b>ověří volbu svých bází</b> a sdělí ji Bobovi. Bob sdělí zpět Alici, ve kterých časových intervalech použili <b>stejnou bázi</b> .	shoda bází	NO	OK	-	NO	-	OK	OK	-	OK	OK	OK
			1				1	0		1	0	1
<b>Pro odhalení Evy</b> vybere Bob náhodně některé bity a pošle je Alici.							0					1
			1				1			1	0	
Pokud se vybrané bity shodují, je možno zbylé bity použít pro jejich tajný <b>finální klíč</b> . (Pokud ke shodě nedošlo, klíč se nepoužije.)												

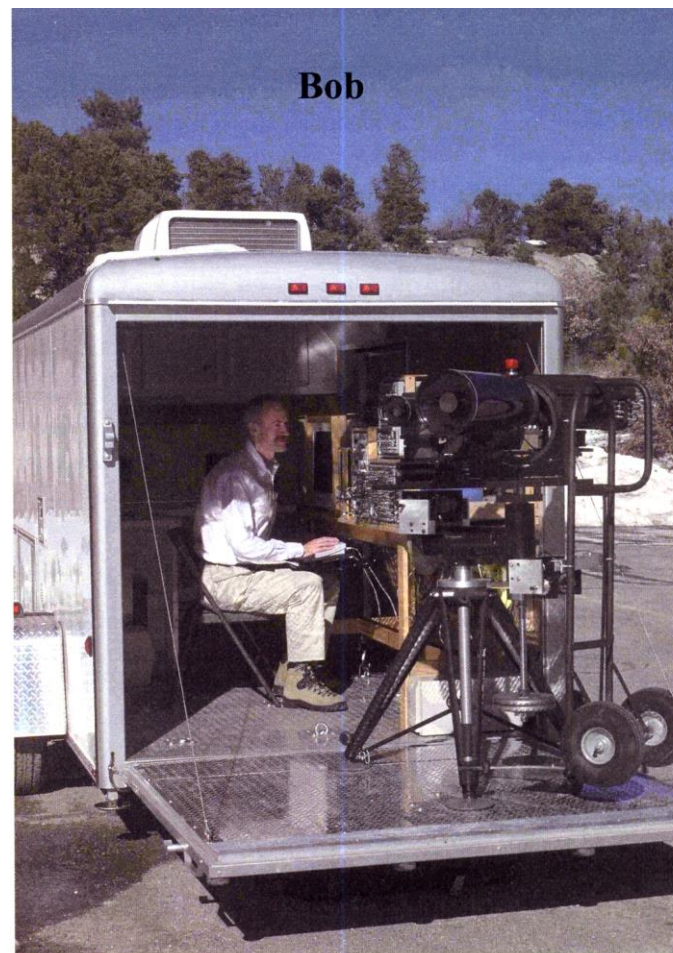
# Nové trendy a aplikace

## Optická část vysílače (Alice)



Šifra: 0101 ...      11 = 0  
Klíč: 1110 ...      10 = 1  
Zpráva: 1011 ...    01 = 1  
                         00 = 0

## Elektronická a optická část přijímače (Bob)

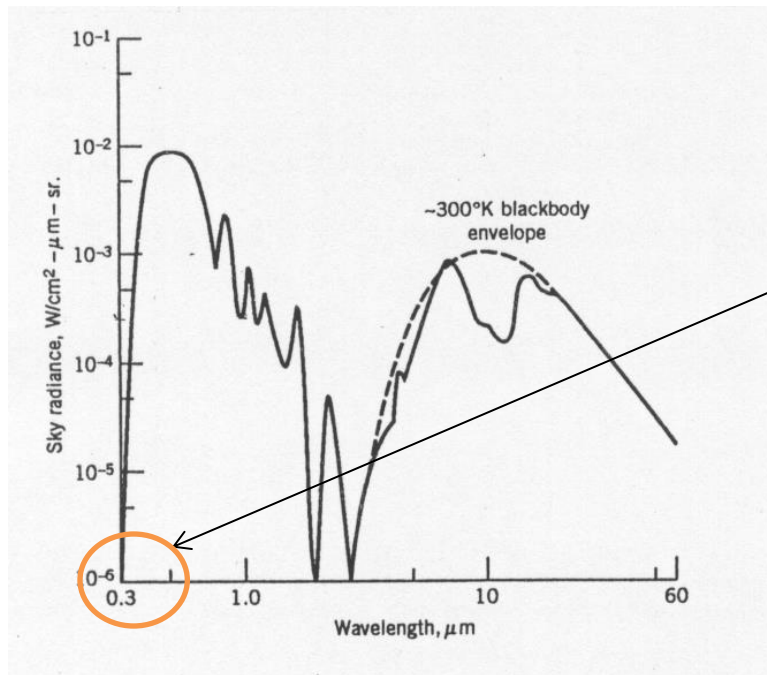


# Nové trendy a aplikace

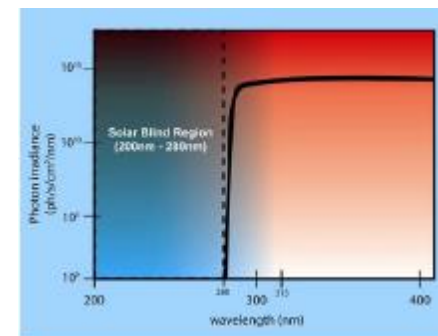
**Spoje nevyžadující přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem**

**Ozařování zemského povrchu a „sluneční slepota“.**

Pásmo „sluneční slepoty“ nabízí optickou komunikaci ve volném prostoru podmínky absence záření pozadí.



**Sluneční záření dopadající na zemský povrch v této oblasti spektra je zanedbatelné.**

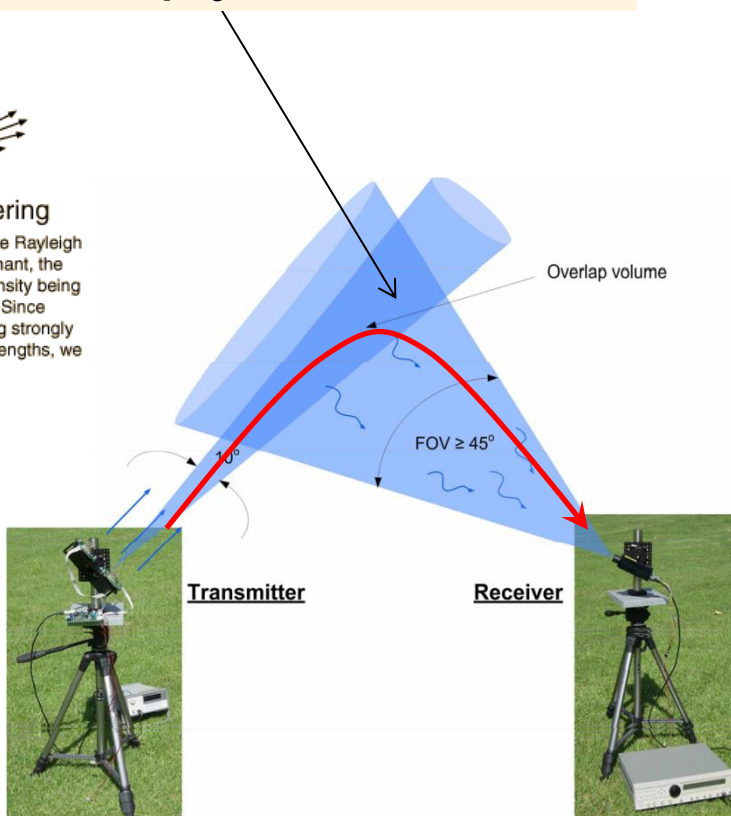
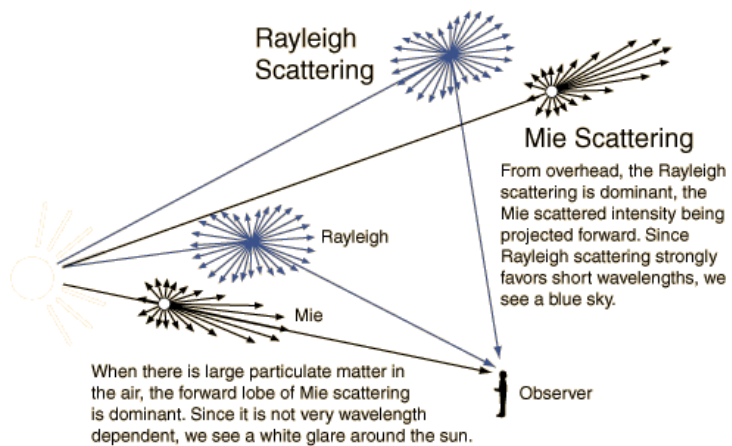




# Nové trendy a aplikace

## Vyzařovací charakteristiky vysílačů a zorná pole přijímačů

Rozptyl v důsledku interakce částic látky a pole v průniku kuželových charakteristik vysílače a přijímače.



TX

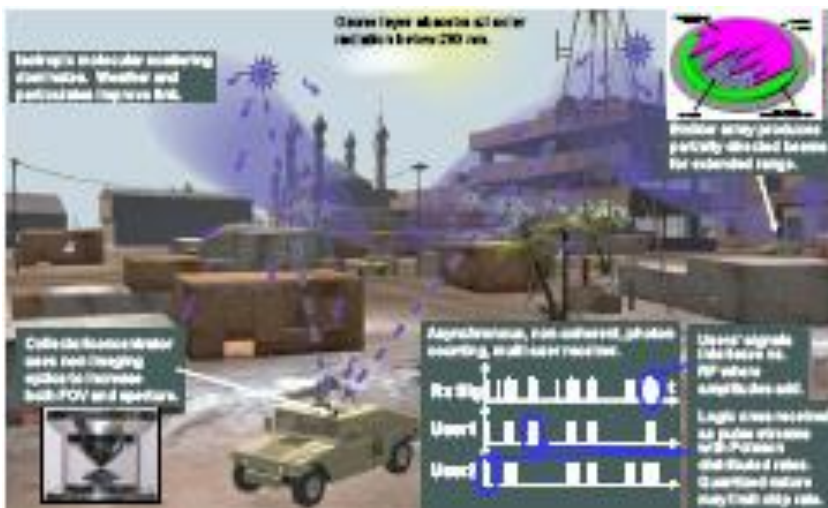
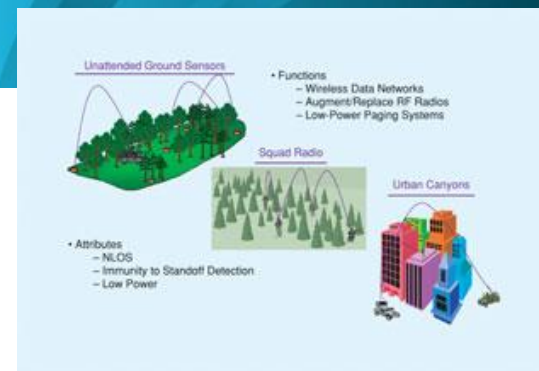
RX  
pracující v  
podmínkách  
absence záření  
pozadí

# Nové trendy a aplikace

## UV komunikační systém nabízí speciální vlastnosti:

- necitlivost vůči zhoršeným meteorologickým podmínkám
- možnost komunikace i v případech kdy neexistuje přímá viditelnost

Přenosová rychlost řádu 100 kb/s při BER  $10^{-7}$  a vzdálenosti mezi komunikačními uzly řádu 100 metrů.

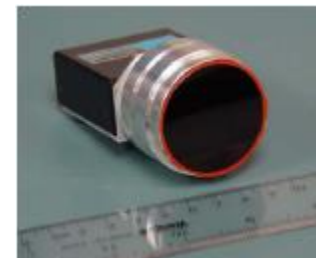


UV LED

Přijímač (fotonásobič)



UV koncentrátor



APD v GM – v budoucnu

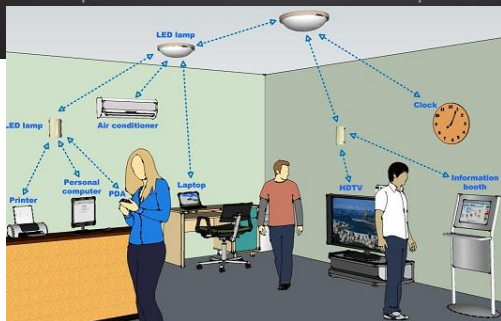
Demonstrován byl přenos hlasu pomocí přenosných transceiverů.



# Nové trendy a aplikace

## Visible Light Communication (VLC):

- Komunikace pomocí viditelného nekoherentního světla
- Indoor komunikace, **kooperace** se systémy Wi-Fi
- Outdoor komunikace – součást Inteligentního dopravního systému (ITS)
- Navigační systém pro obchodní domy (Philips)



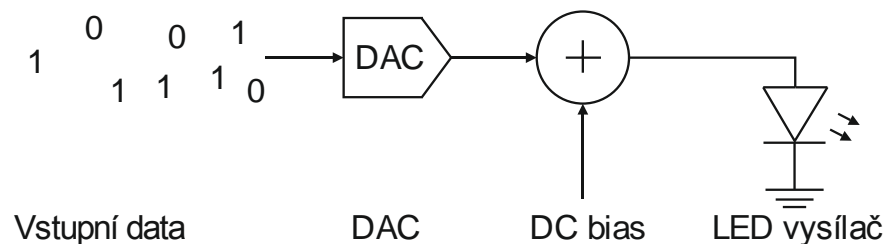
# Nové trendy a aplikace

## VLC – Optický digitálně-analogový převodník (ODAC):

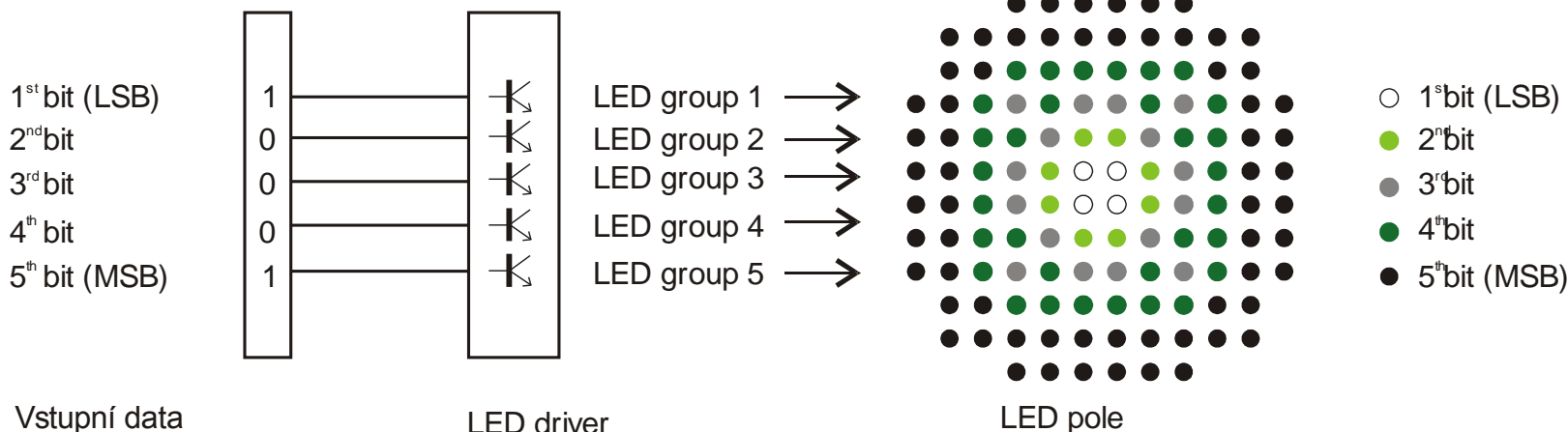
- Skupiny LED (od LSB po MSB)
- Konverze digitálního signálu na analogový v optické oblasti
- Redukce vlivů nelinearit – konstantní proud každou LED
- Plně digitální vstup
- Trend vývoje vysílače - LED pole

ODAC = nové řešení

Klasické řízení LED vysílače



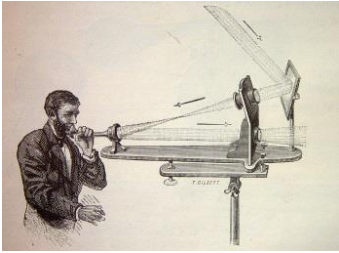
## Konvenční řízení LED vs. ODAC



# ZÁVĚR

- **Analýzy perspektiv technologií BOK** svědčí o jejich velmi dobré budoucnosti
  - analýza *investic* ukazuje v oblasti BOK nárůst na dvojnásobek v roce 2019 oproti roku 2014
  - vysoké požadavky na technologie BOK budou zabezpečeny *interoperabilitou* s jinými technologiemi (světlovodnými, radiovými)
- **Výrobou technologií BOK** se zabývá řada firem v USA, Evropě, Rusku, Japonsku a Číně
  - mezi nejvýznamnější *firmy* patří: *LightPointe (USA)* a *MOSTCOM (Rusko)*
  - rozvoji technik a technologií v Evropě pomáhá Evropský *projekt* *Opticwise (COST)*
- **Výzkum a vývoj v oblasti BOK** je zaměřen na použití spojů v *kosmu, atmosféře i vodním prostředí* (použití na satelitech, letounech, dronech, mobilních prostředcích, budovách a podvodních prostředcích)
- **Výzkum v oblasti BOK v ČR** s mezinárodní spoluprací probíhá na *ČVUT, VUT v Brně a VŠB TU* v Ostravě. Zvláštní pozornost je věnována:
  - *tvarování svazku, difrakčním jevům*
  - *charakterizaci atmosféry v časové oblasti*
  - *standardním atmosférickým jevům a tzv. "nestandardním" jevům zhoršující nedostupnost*
  - *plně fotonickému spoji určenému k přenosu synchronizačních impulsů*
  - *vývoji technologie pro VLC*

# ZÁVĚR



Photophone  
Alexander Graham Bell  
1880

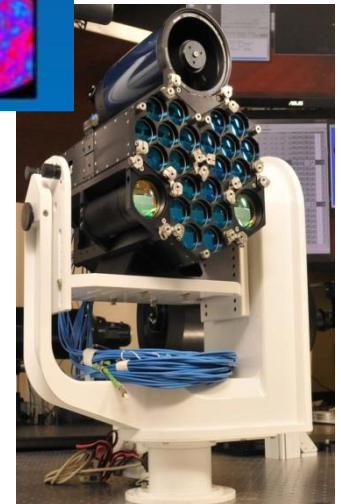
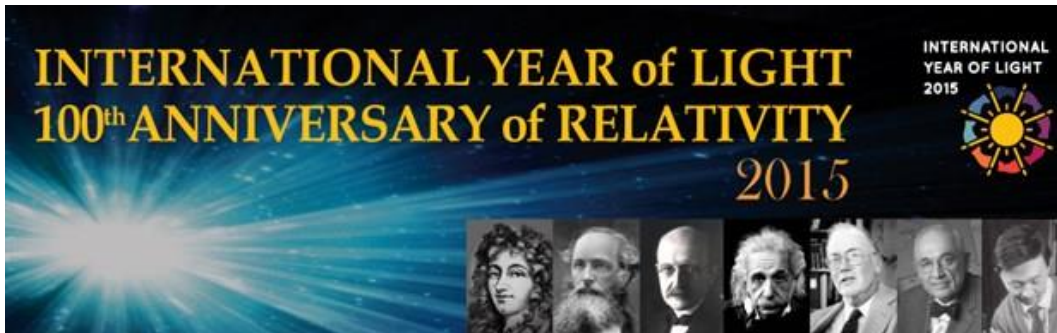
## Why 2015?

- 1015 Ibn Al Haythem *Book of Optics*
- 1815 Fresnel and the wave nature of light
- 1865 Maxwell and electromagnetic waves
- 1915 General relativity – cosmology to GPS
- 1965 Cosmic microwave background; Charles Kao and optical fibre technology



Alhazen  
1015

2015



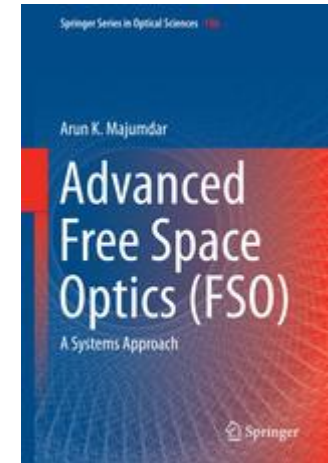


# ZÁVĚR

Evropský  
projekt:



Významná  
přehledová  
knih



Skupina na VUT  
s 25-letou tradicí



**Závěry výzkumu  
konaného v rámci  
OPTICWISE budou  
vydány knižně**