



水下无线光通信的安全可靠传输与 自适应调控技术研究

高冠军

北京邮电大学

信息光子学与光通信国家重点实验室

ggj@bupt.edu.cn 13811306225

提纲

1. 研究背景与研究动机
2. 基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信
3. 基于扩频加密OFDM的水下无线光通信
4. 水下无线光通信的大动态范围接收调控
5. 研究总结与讨论



1、研究背景和动机

水下无线光通信技术特点

Telemetry Method	Range	Data Rate	Efficiency
Acoustic	Several km	1 kbps	100 bits/Joule
Optical	100 meters	1 Mbps	30,000 bits/Joule

Table 1. Performance comparison of acoustic and optical telemetry

N. F. Pontbriand OCEANS 2008



Underwater Acoustic Communication

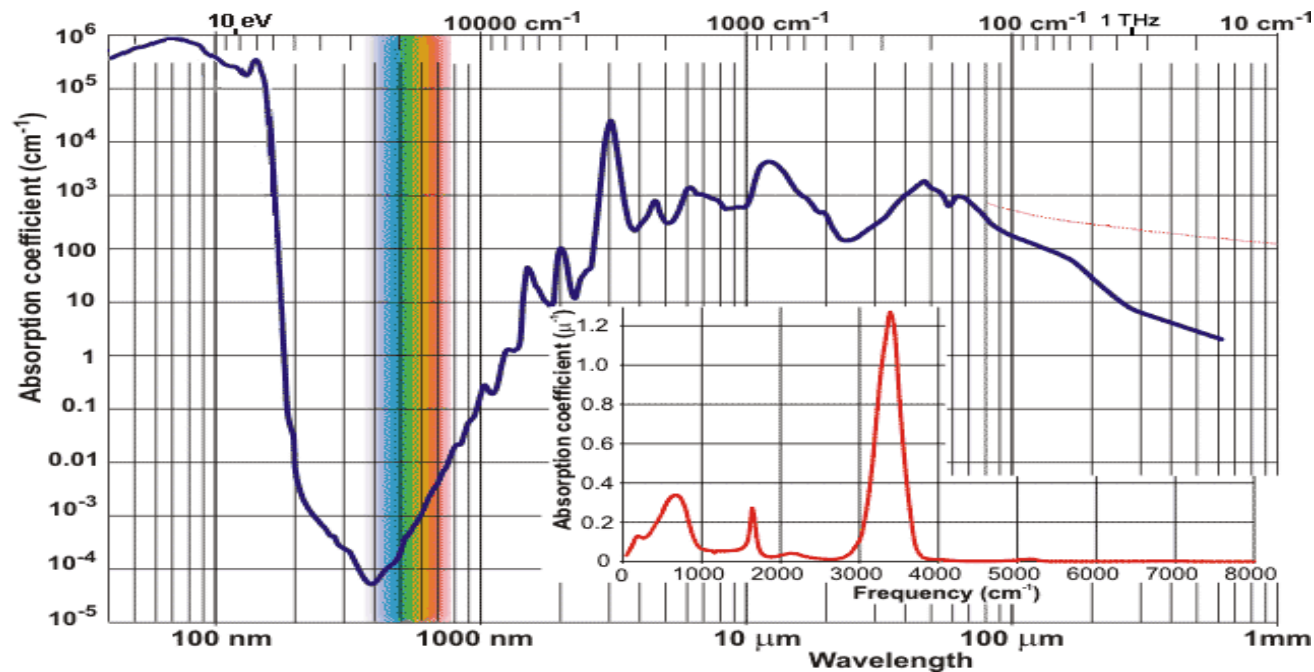
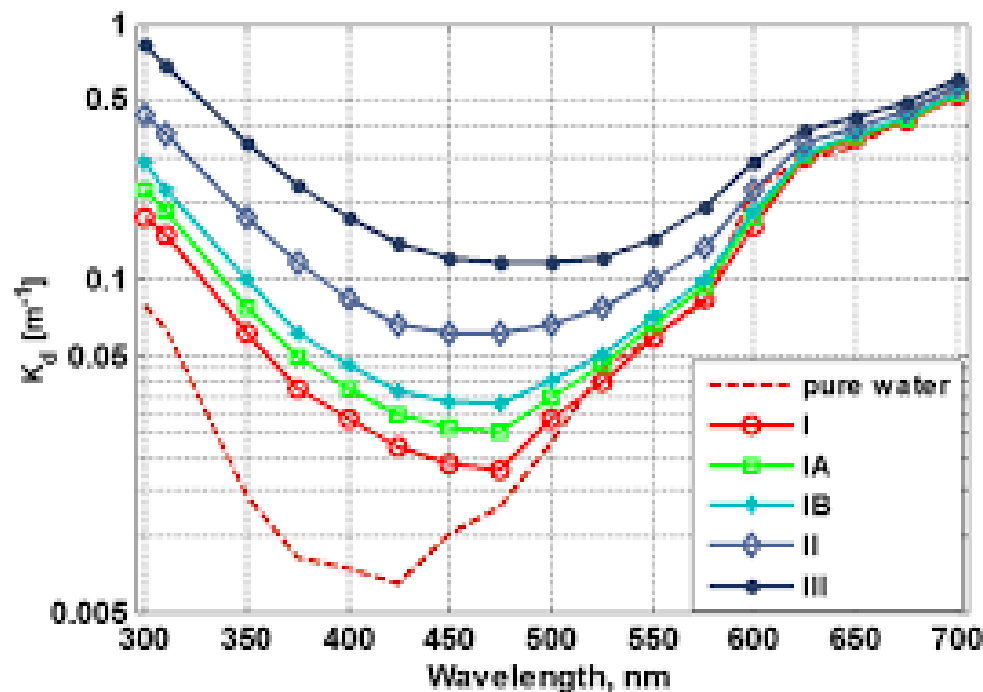
- Advantage: Long range
- Constraints: Speed, Air-water incompatible

Underwater wireless optical Communication

- Advantage: High-speed, air-water convergent
- Constraints: short range

水下无线光通信是目前近距高速水下无线通信的有效方式

1、研究背景和动机



大气光通信 (FSO): 1-10 **dB/km**

水下光通信 (UWOC) : 1-10 **dB/m**

Turbid Water: longer wavelength

NIR attenuation: 10dB larger than Blue

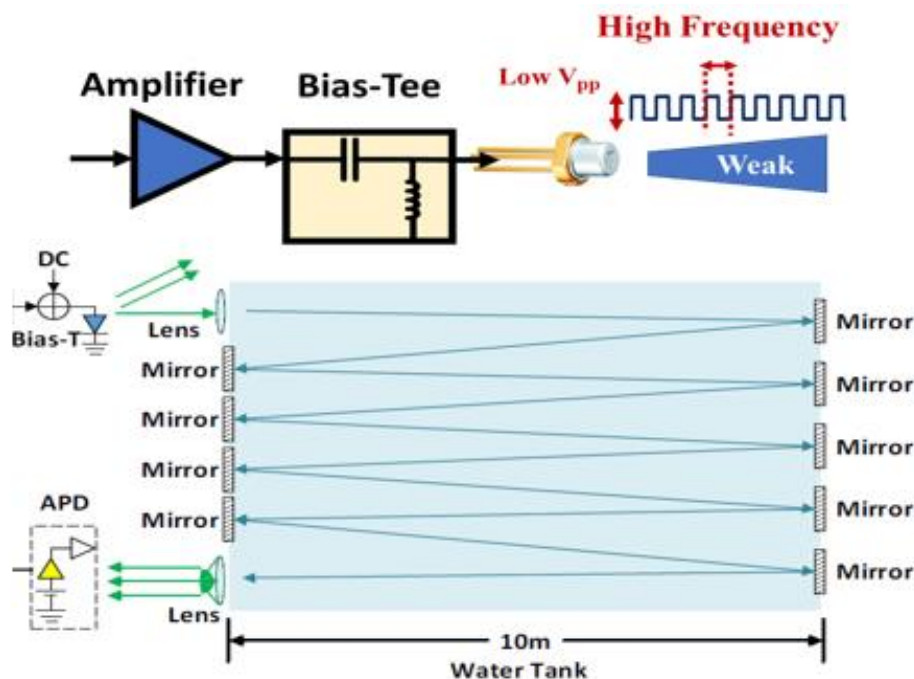
Water Types	λ	a [m^{-1}]	b [m^{-1}]	c [m^{-1}]	L_{ext}	Source
Turbid Harbor	514 nm (green)	0.37	1.82	2.19	0.45 m	Petzold ⁴ (1972)
Clear Ocean	514 nm (green)	0.11	0.037	0.15	6.7 m	Petzold (1972)
	470 nm (blue)	0.038*	0.012*	0.05	20 m	Pontbriand ⁵ (2008)



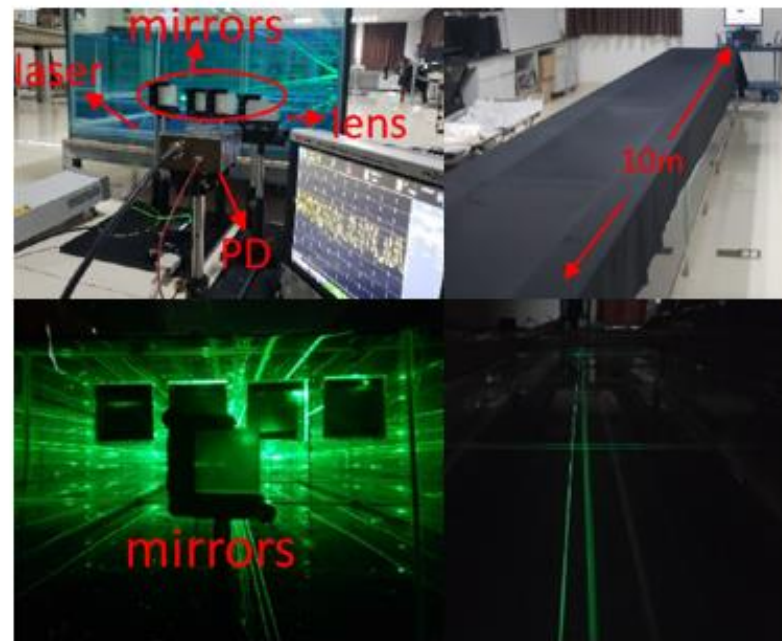
1、研究背景和动机

已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



高速长距离蓝绿激光通信示意图



实验装置

J. Wang, et al., Opt. Express, vol. 27, no. 9, pp. 12171-12181, Apr. 2019

中国科技大学高速水下光通信离线实验 2018年 500Mb/s 100m



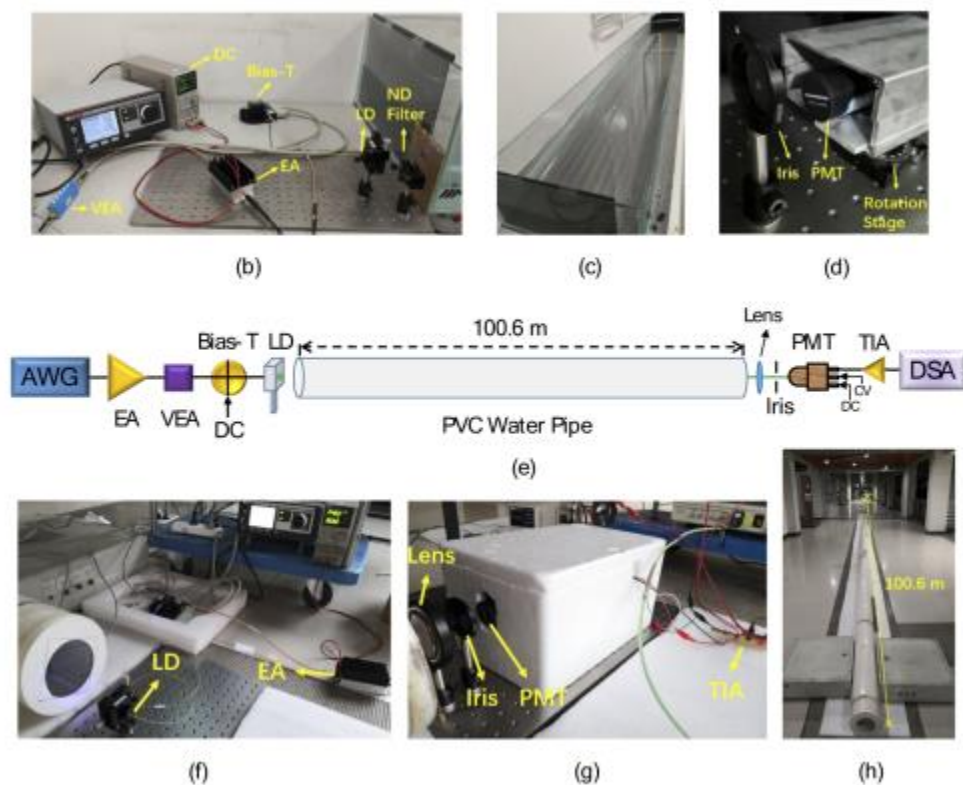
北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机

已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



浙江大学 2022年 100-m/3-Gbps

Chao Fei, et al., Opt. Express 30, 2326-2337 (2022)

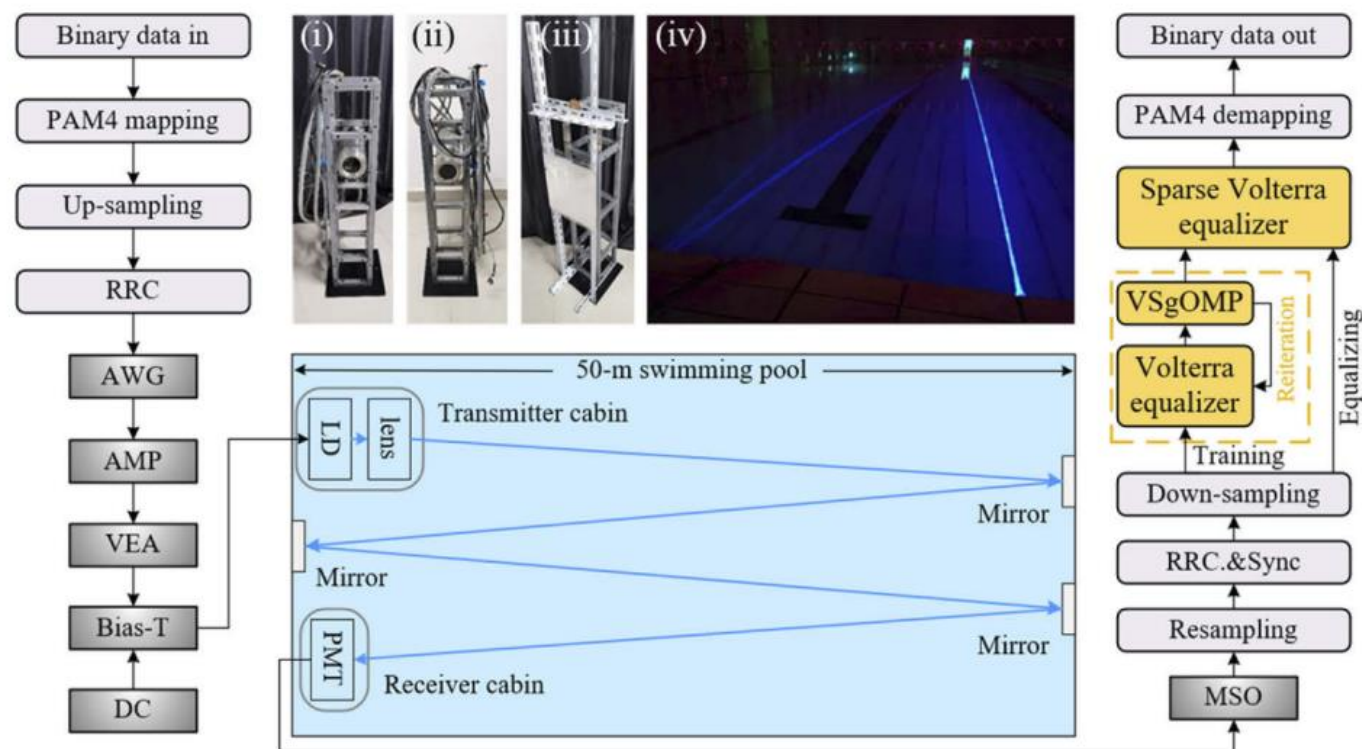


Fig. 2. Experimental setup of the proposed UWOC system. Insets: (i) the transmitter cabin, (ii) the receiver cabin, (iii) the mirror, and (iv) the 50-m swimming pool.

浙江大学 2021年 200-m/500-Mb/s

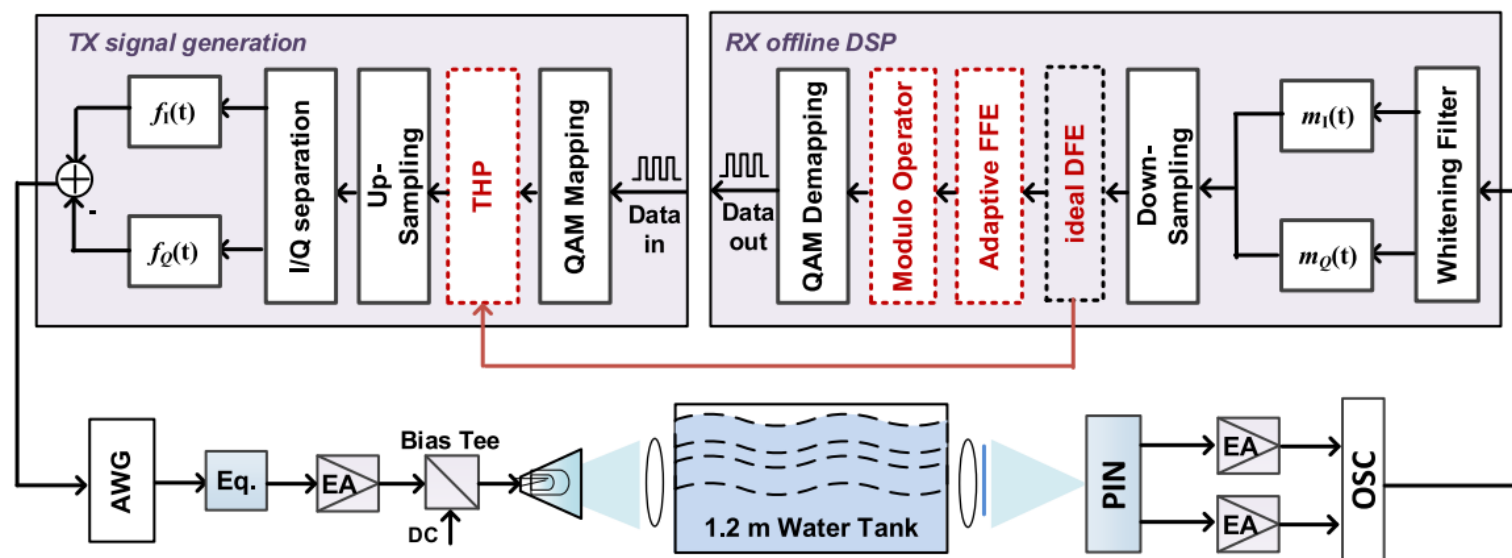
Yizhan Dai, et al., Opt. Express 29, 32228-32243 (2021)



1、研究背景和动机

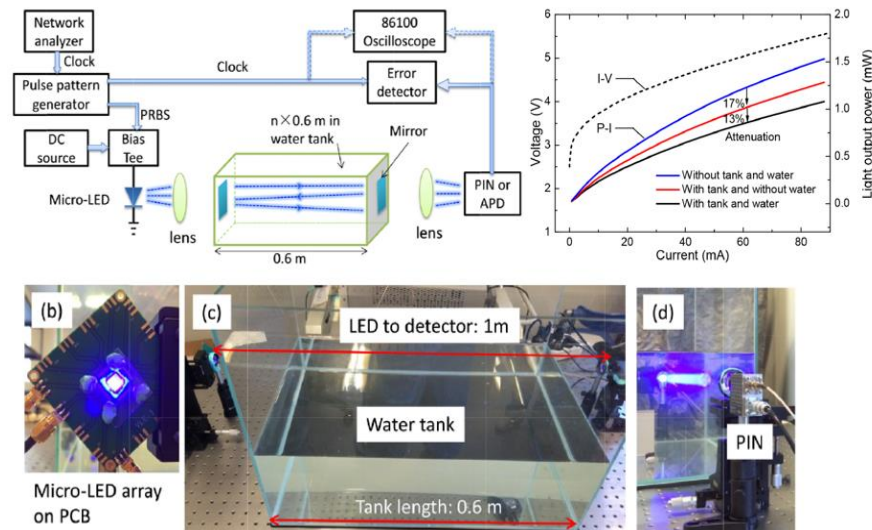
已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



复旦大学 2022年 2.2Gb/s LED

Wenqing Niu et al., J. Lightwave Technol. 40, 2296-2306 (2022)



复旦大学 氮化镓的Micro-LED水下光通信

P. Tian et al., Opt. Express 25, 1193-1201 (2017)



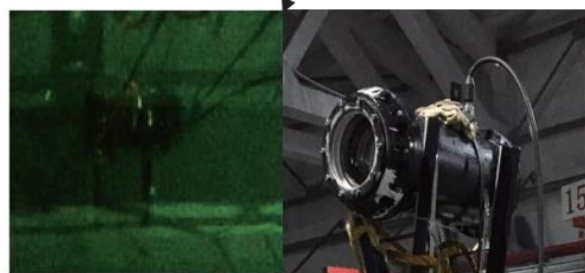
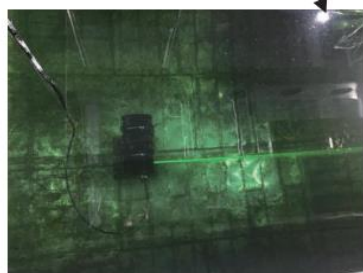
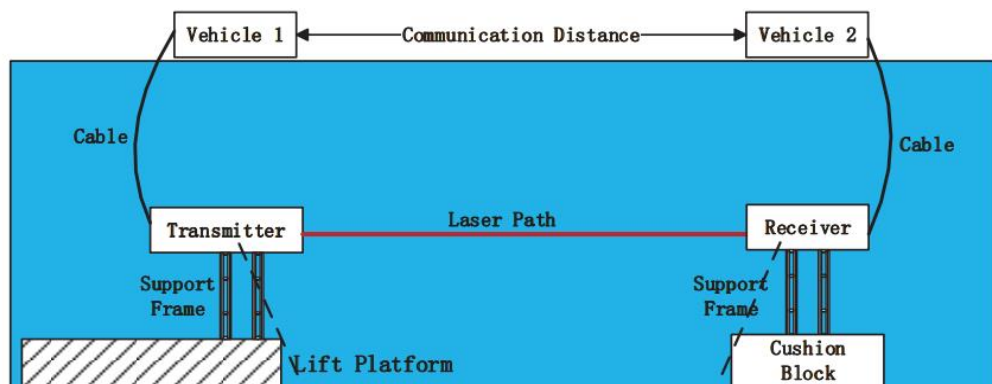
北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机

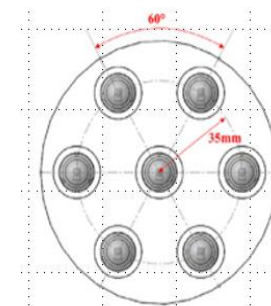
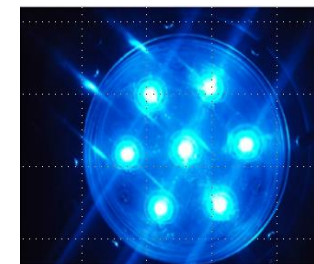
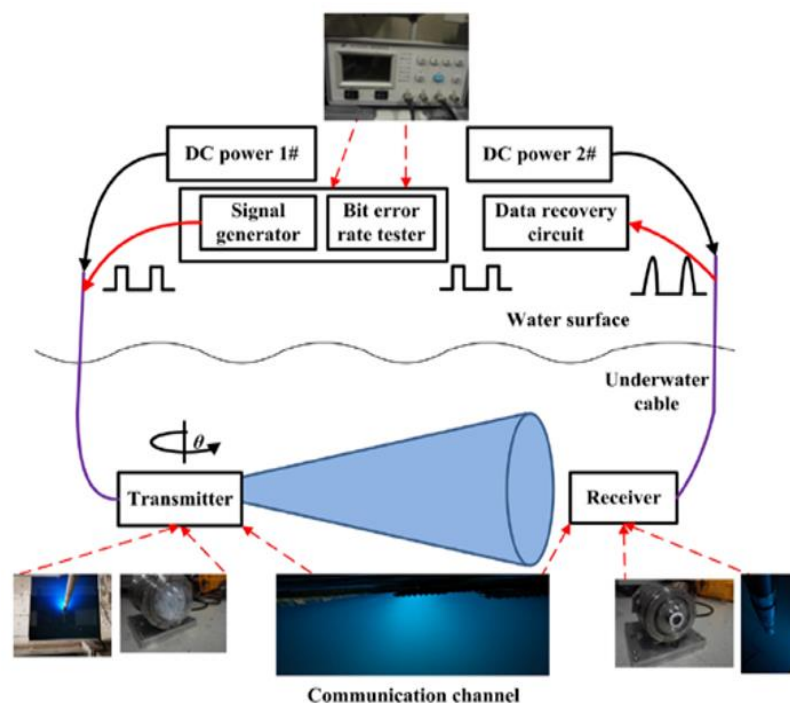
已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



上海光机所 超高灵敏度3.32bits/photon接收

S. Hu et al., Opt. Exp., 26(17), p 21685-21699 (2018)



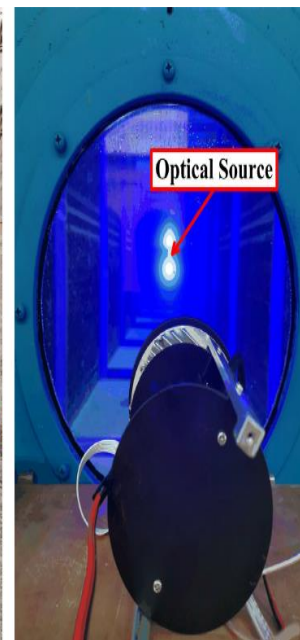
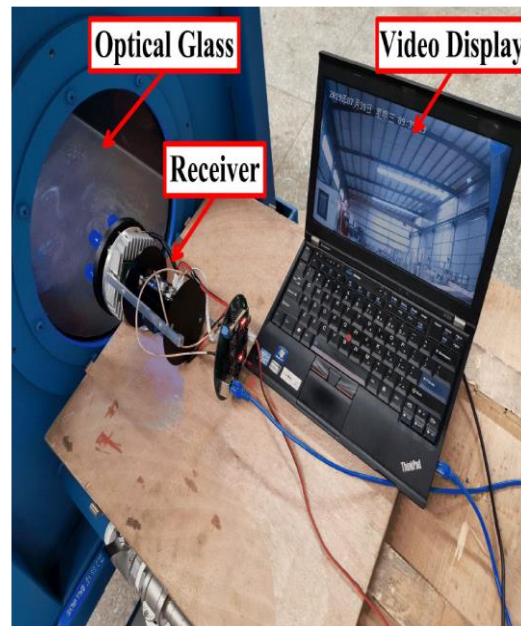
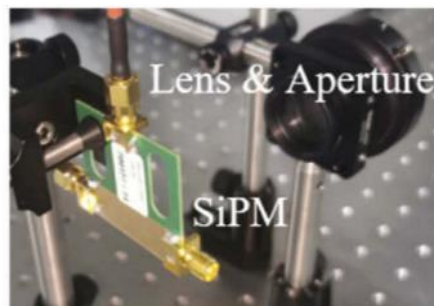
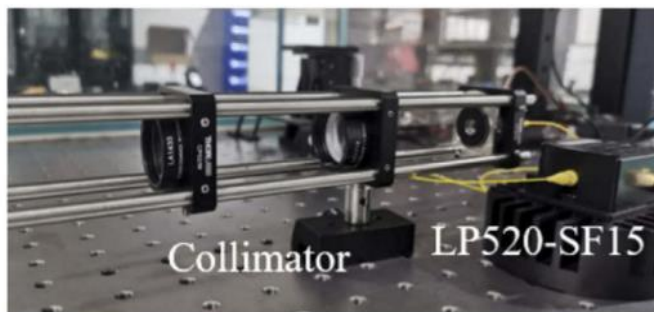
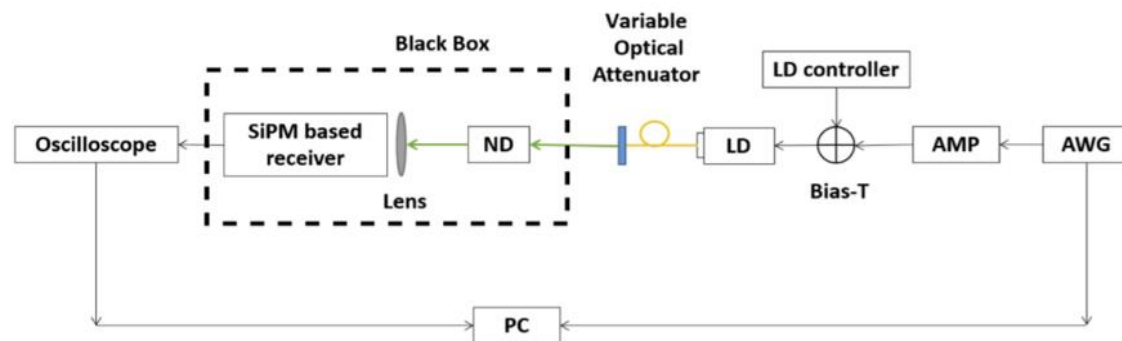
西安光机所 大角度深海LED通信样机

B. Han., et al., Optics Communications, vol. 434: p. 184-190, 2019.

1、研究背景和动机

已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



广东鹏城实验室基于SiPM的高速大衰减水下光通信实验

S. Hu et al., Opt. Exp., 26(17), p 21685-21699 (2018)

南京邮电大学水下蓝绿光LED通信样机

B. Han., et al., Optics Communications, vol. 434: p. 184-190 (2019).



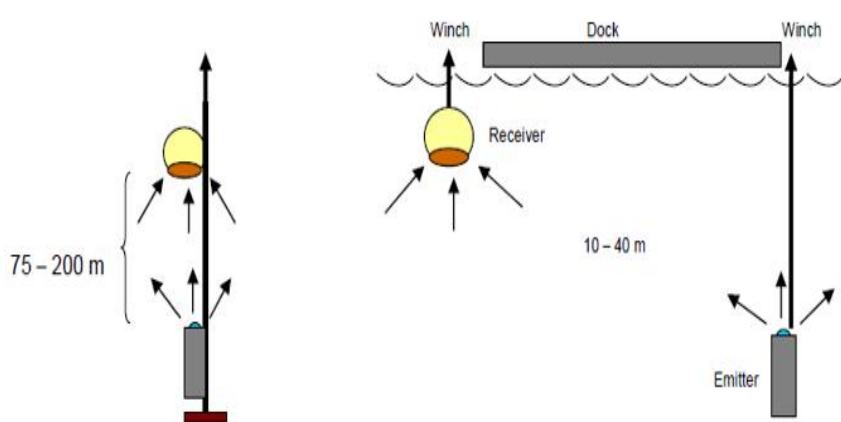
北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机

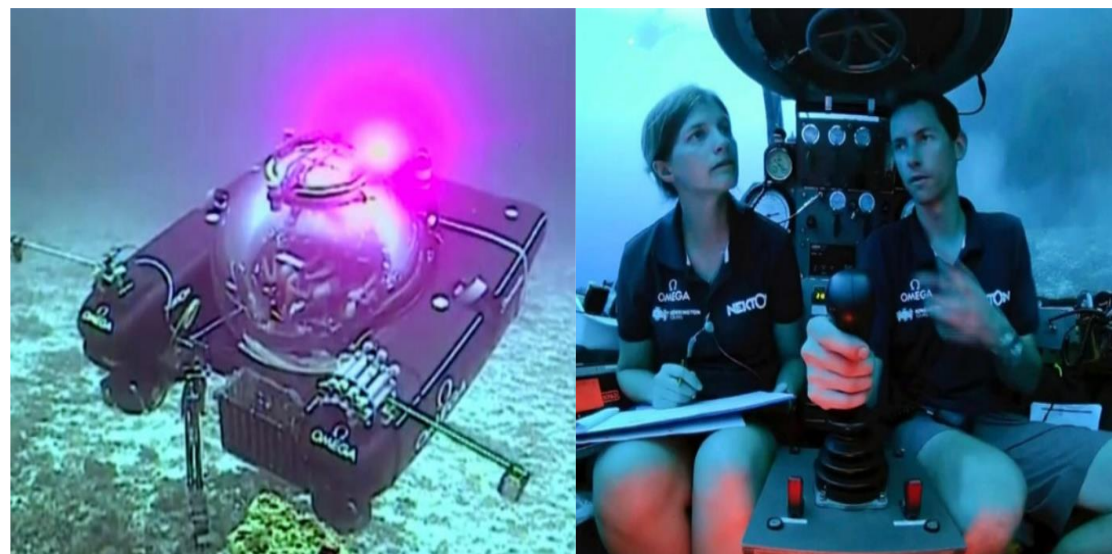
已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



百慕大海试实验示意图

伍兹霍尔码头实验示意图



美国伍兹霍尔海洋研究所水下蓝绿光通信技术进展

BLUECOMM200无缆海底直播

N. F. Pontbriand OCEANS 2008

<https://www.sonardyne.com/science-behind-bluecomm>.



北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机

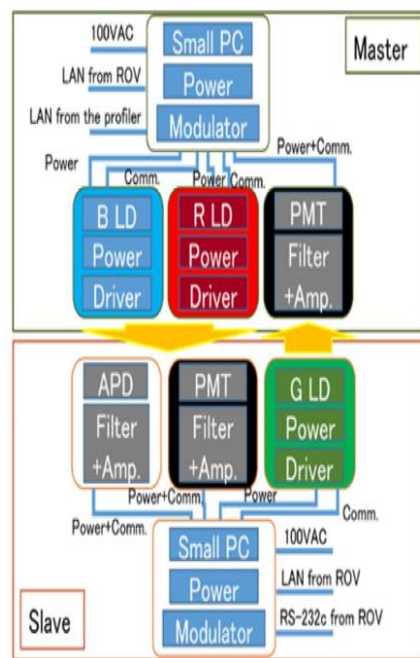
已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



法国IFREMER开展夜间浅海实验的装置及现场图

P. Leon et al., OCEANS 2017 - Aberdeen, 2017.

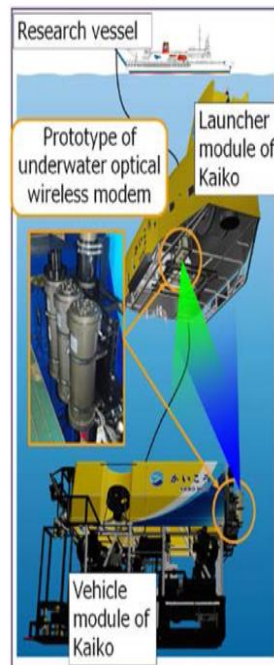


JAMSTECH原型机模块示意图

Weight	40 kg in air
Power consumption	350 W max.
Wavelength	450, 525, 640 nm
Max. output light power	>5 W
Beam angle	variable (depending on the lens)
Operating depth	up to 1000 m
Communication protocol	100 M Ethernet (TCP, UDP)
Modulation	OOK
Coding	4B/5B
APD	Bandwidth: 300-1070 nm Response: up to 48 MHz
PMT	Bandwidth: 230-920 nm Response: up to 24 MHz
Optical filter (in front of the detector)	Around 20 nm bandpass matched for each emitted color
LD	Optical power: over 5W



JAMSTECH通信样机及详细参数



海上通信测试示意图

日本国立海洋研究开发机构水下光通信机进展

T. Sawa, IEICE Transactions on 102, no. 1 (2019): 156-167



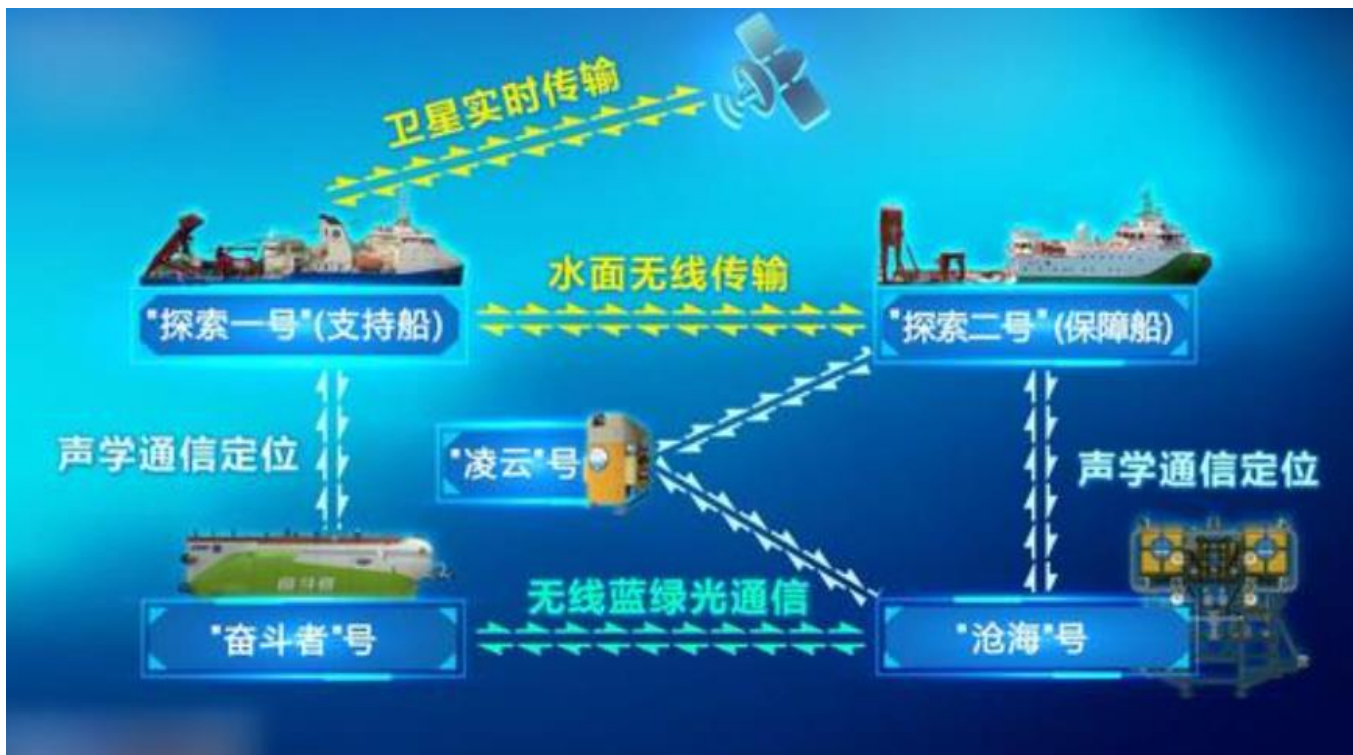
北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机

已有研究工作：水下无线光通信速率、距离不断刷新记录

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等



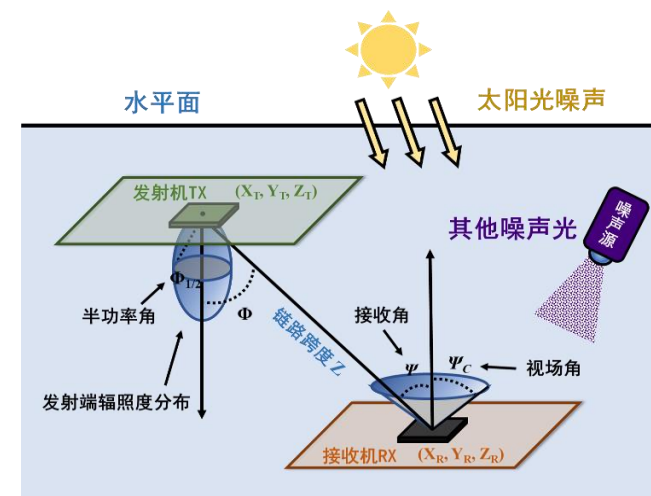
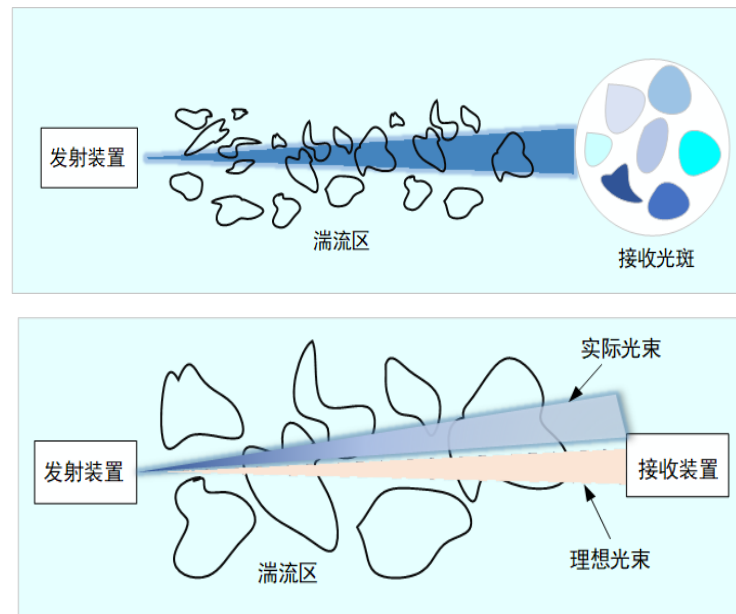
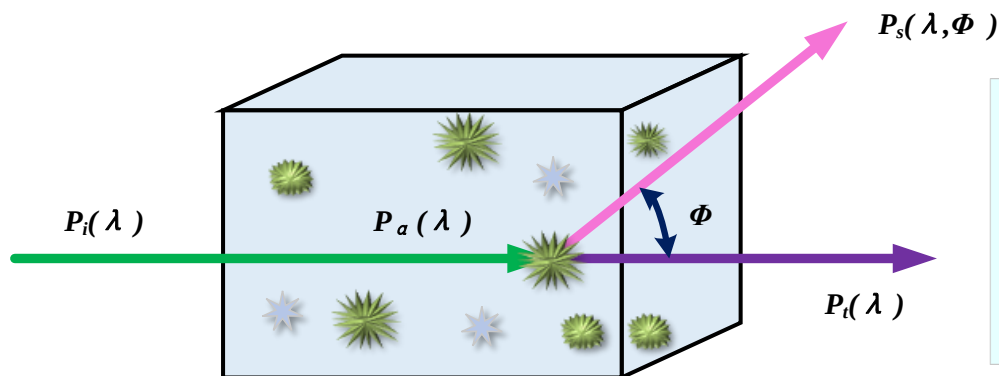
西安光机所 深海无线光通信机在“奋斗者号”上应用 (2020年11月10日马里亚纳海沟)



北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机



信道特征

- 吸收与散射
- 湍流与振动
- 背景光干扰

限制因素

- 功率预算受限
- 信道带宽受限
- 难以对准、抖动与不稳定
- 干扰光与信号泄露

1、研究背景和动机

Dark deep water

UWOC communication with large aperture PMT detector **can be interfered by bioluminescence and Cerenkov Radiation, even bellow 1000 meters sea water**, which depth is sufficient to attenuate solar irradiance.

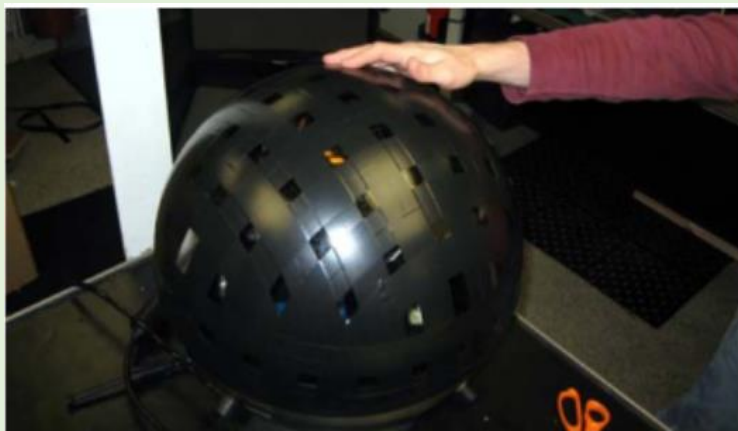


Figure 6. Masked receiver to reduce aperture to 1/9 of full aperture.

N. F. Pontbriand, et al, "Diffuse high-bandwidth optical communications," OCEANS 2008

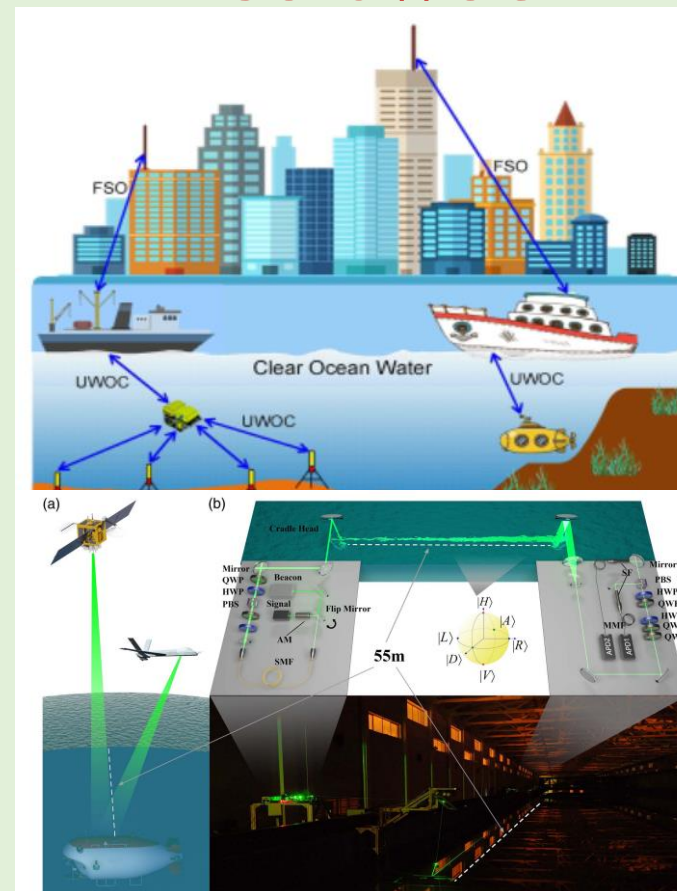
Dark shallow water

Even the ambient light from **moon and the city** (few miles away) **can effectively limit the attainable range using PMT or MPPC**



P. Leon et al., "A new underwater optical modem based on highly sensitive Silicon Photomultipliers," OCEANS 2017

FSO-UWOC



J. Lightw. Technol., 38(7): p. 1766-1776, 2020.
Photonics Research, 7(8): p. A40-A44, 2019.

① 环境背景光对高灵敏度水下无线光通信的干扰不容忽视

1、研究背景和动机



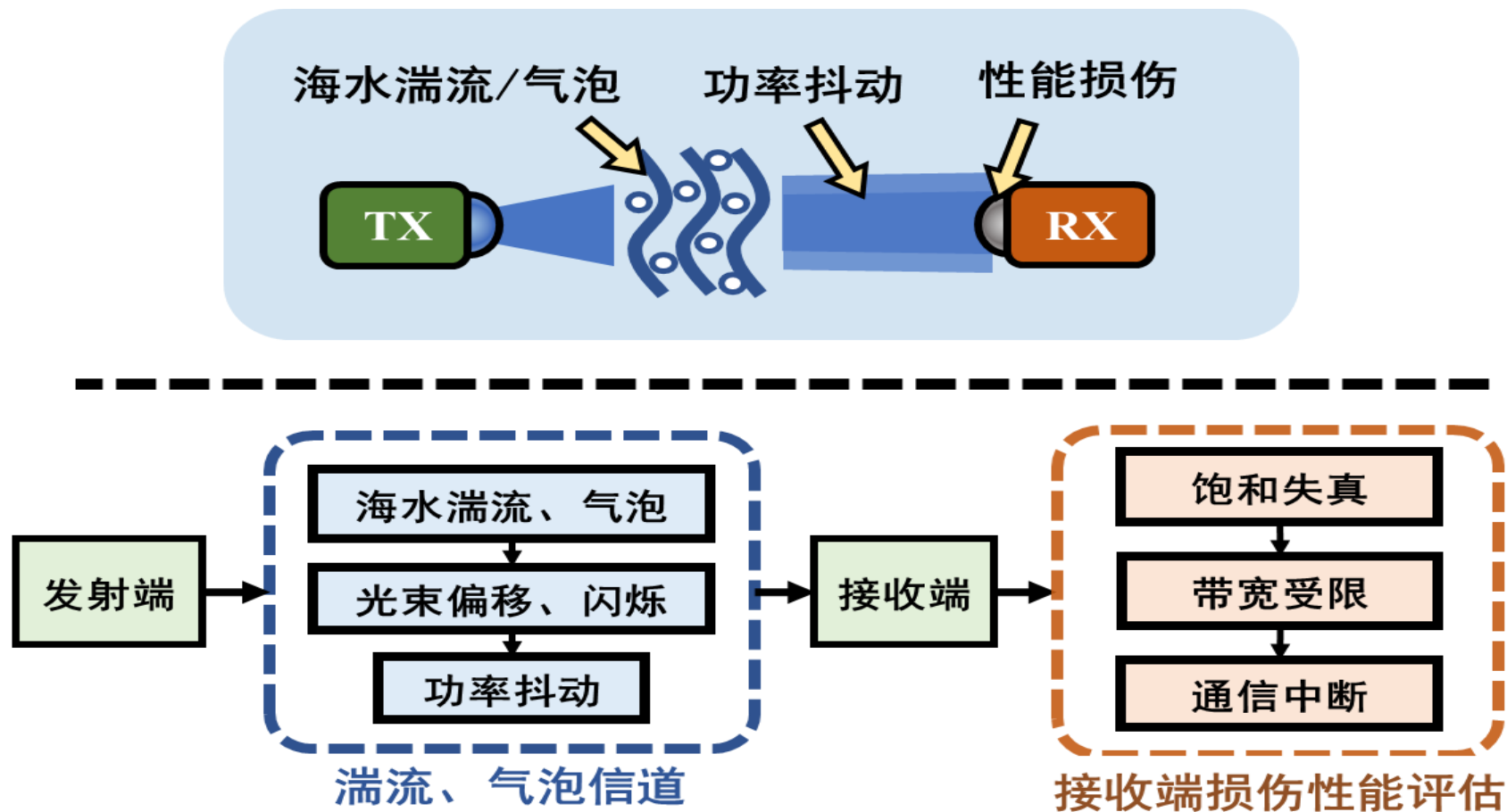
海水湍流、气泡、海洋雪、海底沙尘和平台抖动



北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

1、研究背景和动机



海水湍流、气泡、海洋雪、海底沙尘和平台抖动

② 大动态功率波动限制水下无线光通信稳定性与可靠性

1、研究背景和动机

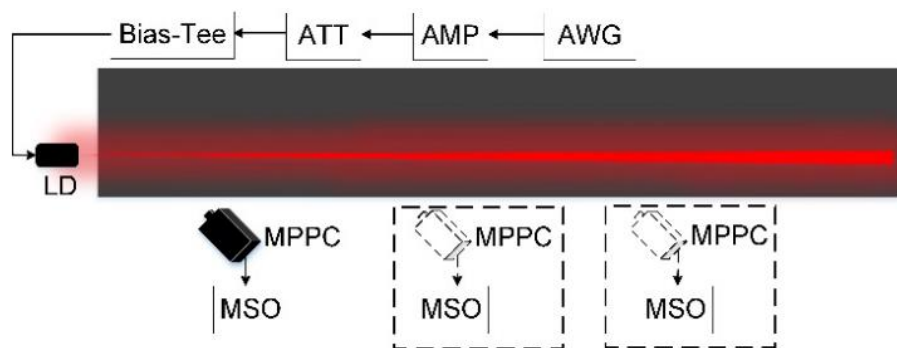
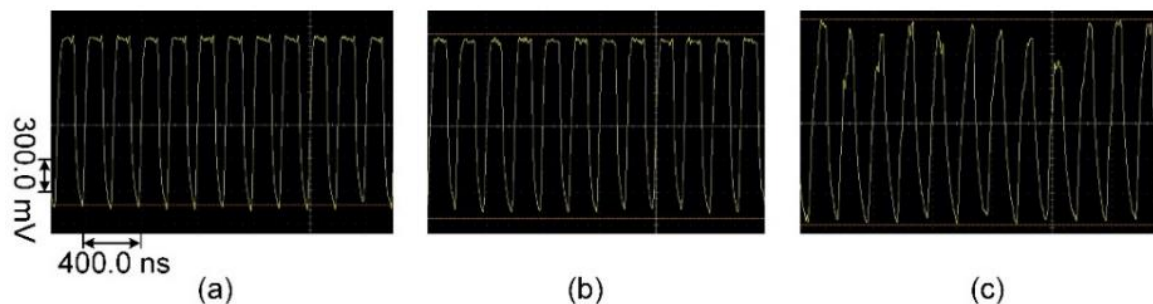
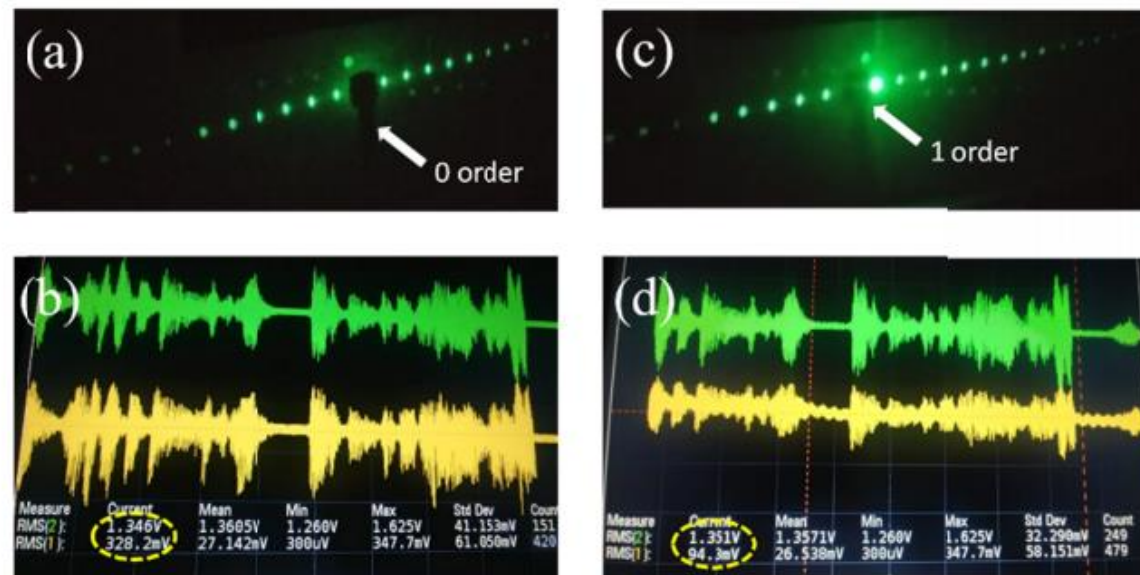


Fig. 3. The experimental setup for verifying information leakage using an MPPC placed aside the light beam.



2017年浙江大学验证 水下无线光通信存在安全隐患

M. Kong, J. Wang, Y. Chen, T. Ali, R. Sarwar, Y. Qiu, S. Wang, J. Han, and J. Xu, "**Security weaknesses of underwater wireless optical communication.**" Optics express 25.18, 2017: 21509-21518.

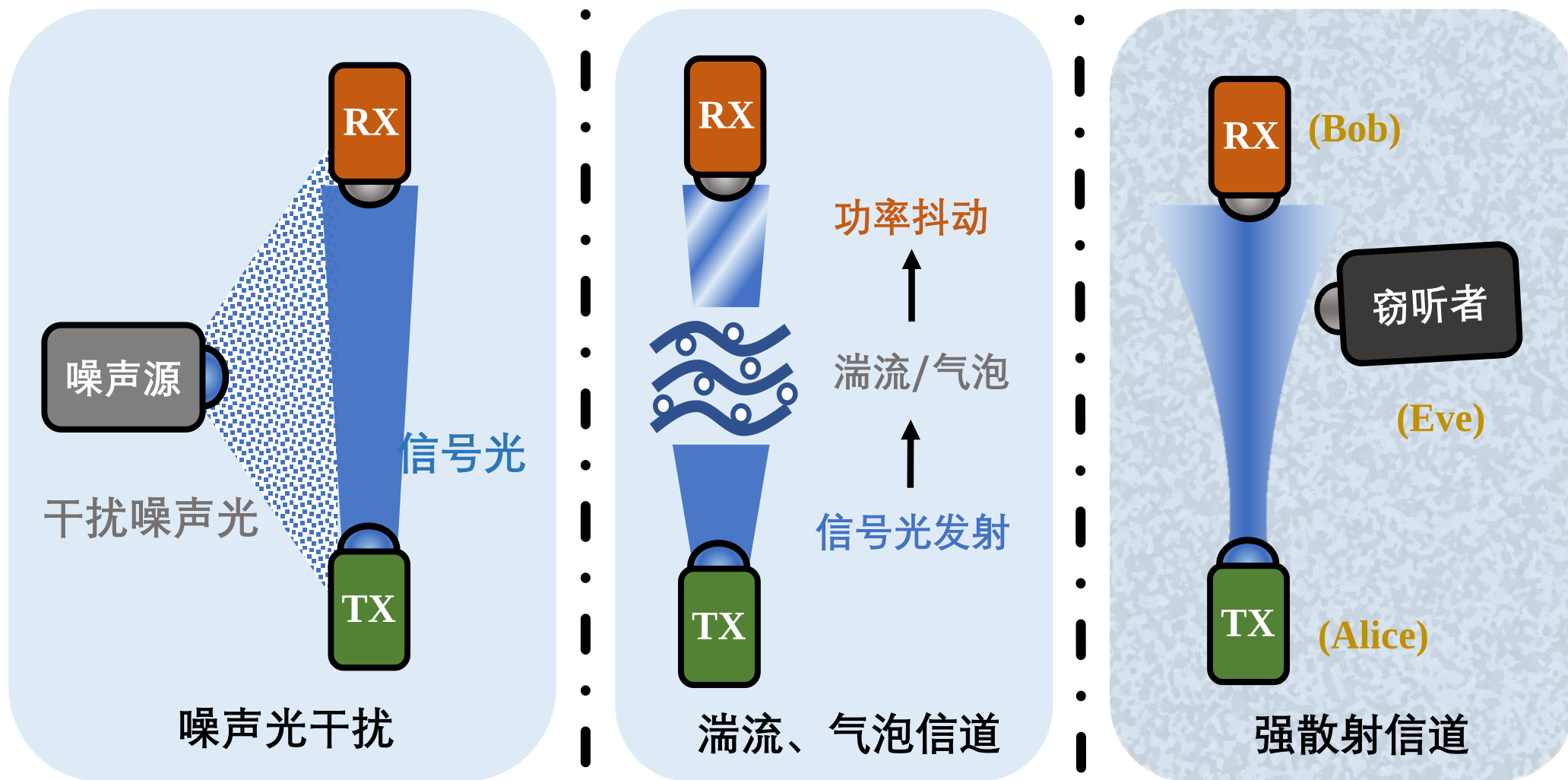


2018年以色列霍隆理工学院验证水下无线光通信可被窃听

D. Shaboy, D. Ronckban, and A. Handelman, "**Tapping underwater wireless optical communication in pure water and natural Dead-Sea ultra-high-salinity water by diffraction grating.**" Optics express 26.23, 2018: 29700-29711.

③ 浑浊散射环境下水下无线光通信安全性面临挑战

1、研究背景和动机



复杂环境下水下无线光通信的可靠性、稳定性和安全性面临挑战

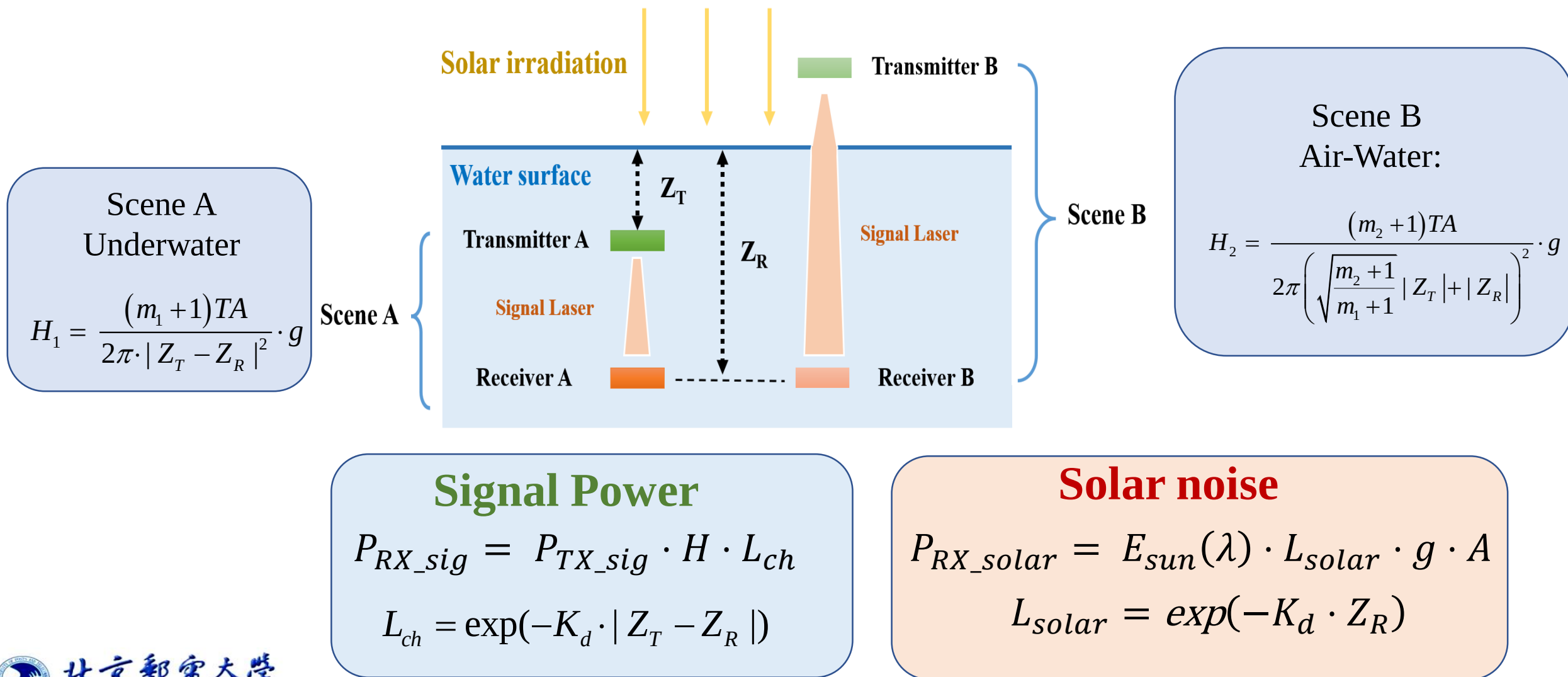
提纲

1. 研究背景与研究动机
- 2. 基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信**
3. 基于扩频加密OFDM的水下无线光通信
4. 水下无线光通信的大动态范围接收调控
5. 研究总结与讨论



2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信

➤ 太阳背景光干扰下的水下无线光通信系统建模



2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信

➤ 接收机性能计算

$$SNR = 20 \times \lg \left(\frac{I_{S_sig}}{I_{N_ANF} + I_{N_solar} + \sigma_{shot} + \sigma_{RIN} + \sigma_{TIA}} \right)$$

Signal power points to I_{S_sig}

Amplifier noise points to I_{N_ANF}

Solar noise points to I_{N_solar}

shot noise points to σ_{shot}

RIN points to σ_{RIN}

Thermal noise points to σ_{TIA}

$$I_{S_sig} = \frac{G\eta e P_{RX_sig} (1 - k_{ANF})}{h\nu}$$

$$P_{RX_ANF} = P_{RX_sig} \cdot k_{ANF}$$

$$I_{N_ANF} = I_{S_sig} \cdot k_{ANF}$$

$$P_{RX_f_solar} = P_{RX_solar} \cdot \frac{B_{filter}}{B_{solar}}$$

$$I_{N_solar} = \frac{G\eta e P_{RX_f_solar}}{h\nu} \cdot k_{sub}$$

$$\sigma_{RIN}^2 = F R I N I_s^2 B$$

$$\sigma_{TIA}^2 = \frac{4K_B T B}{R}$$

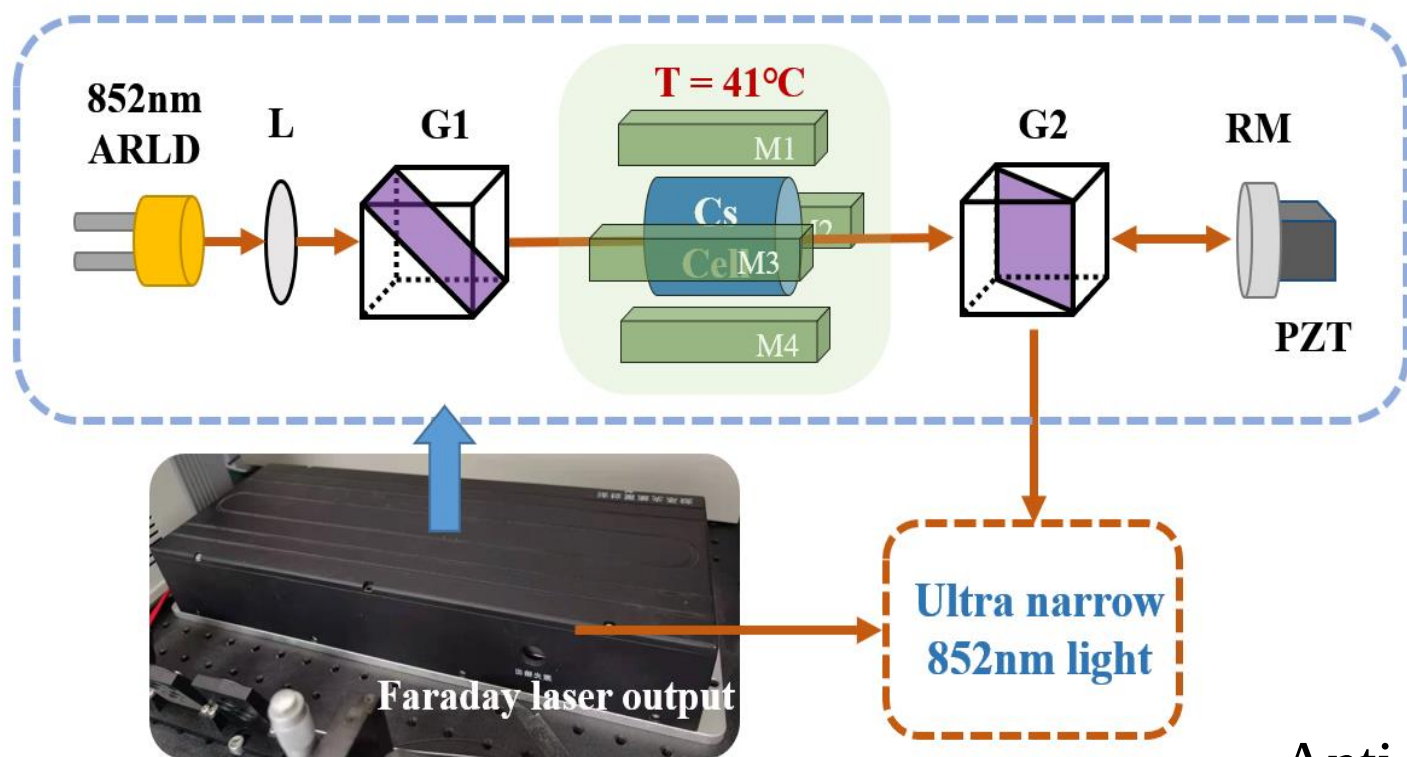
$$\sigma_{shot}^2 = 2eGF(I_{S_sig} + I_{N_solar})B + \frac{2I_{N_solar}^2 B}{B_{filter}} + \frac{4I_{S_sig} I_{N_solar} B}{B_{filter}}$$



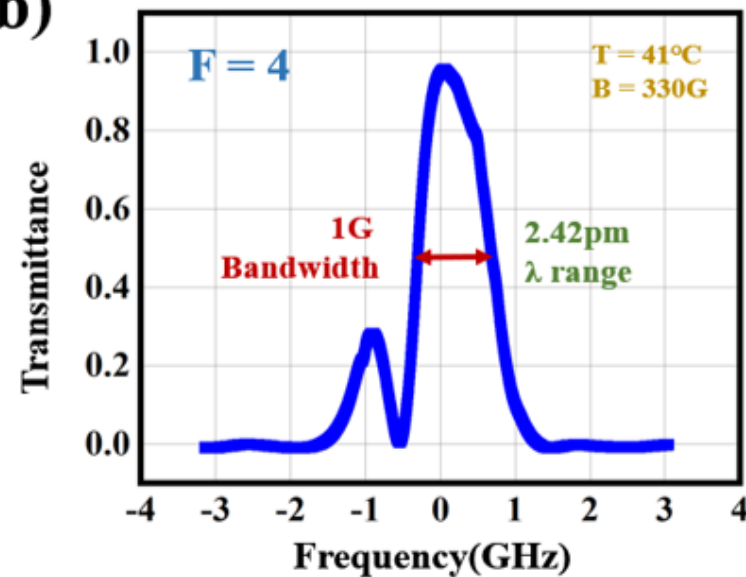
2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信

➤ 法拉第反常色散激光器和原子滤光器原理

(a) Faraday Laser



(b)

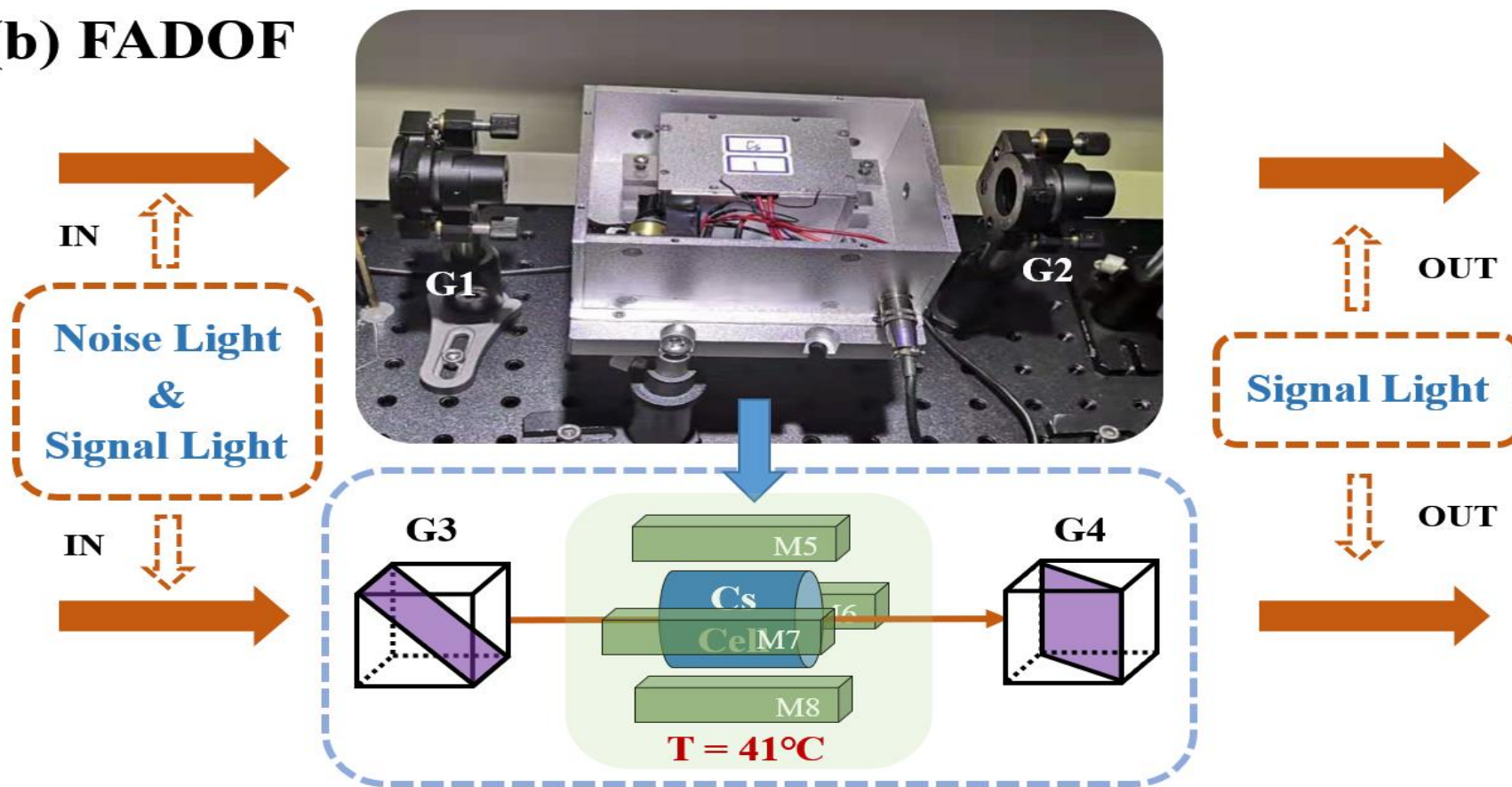


Anti-reflection coated laser diode (ARLD)
Cs 852.356 nm

2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信

➤ 法拉第反常色散激光器和原子滤光器原理

(b) FADOF



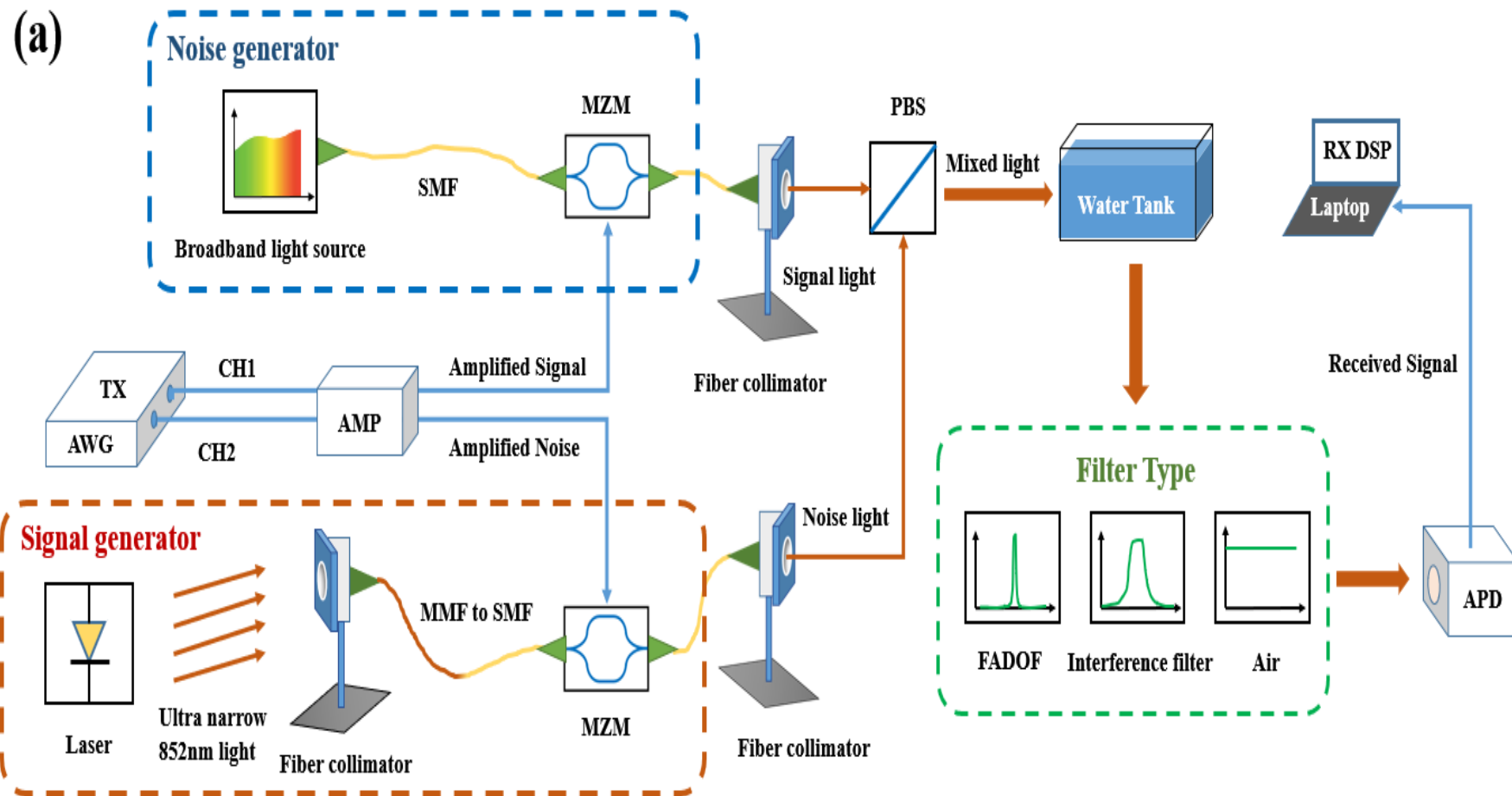
2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信

➤ 实验方案

Laser output power: 20dBm
MZM for signal and noise:
10GHz

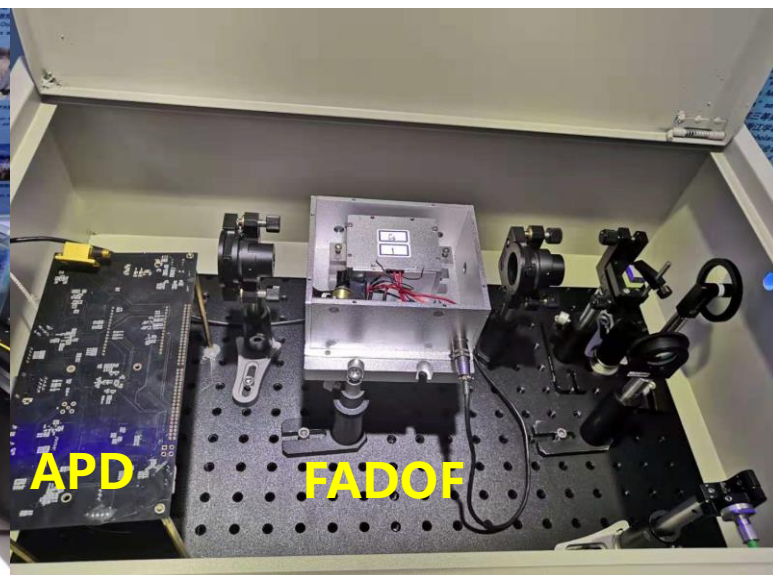
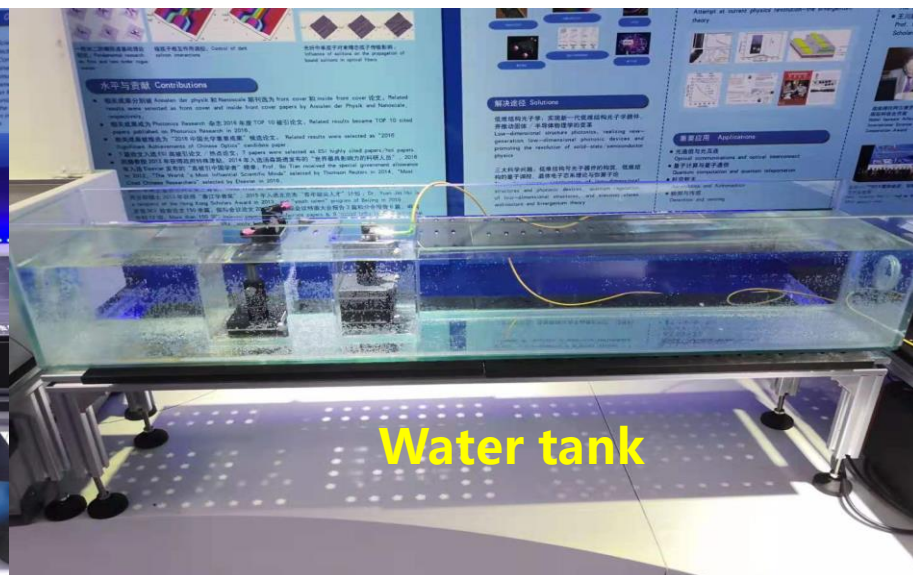
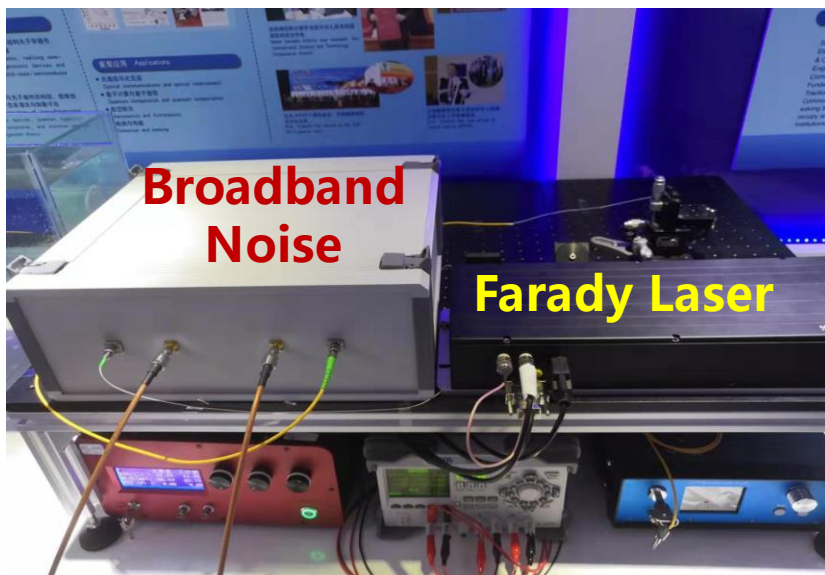
Broadband noise emulation:
Noise laser: 850nm SLD
Spectral width: 20nm
Artificial noise modulation

Narrow-band interference filter
(NBIF) 5nm 95% transmittance

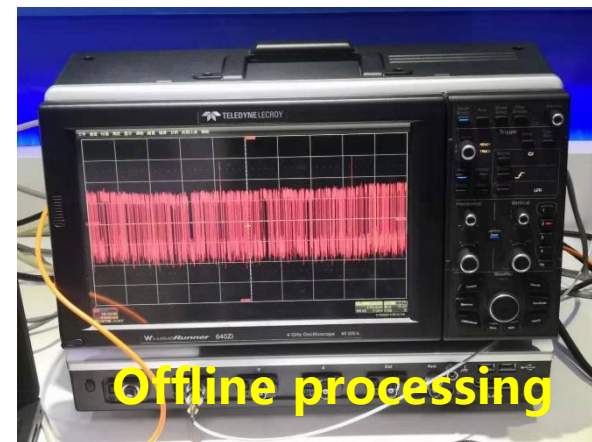
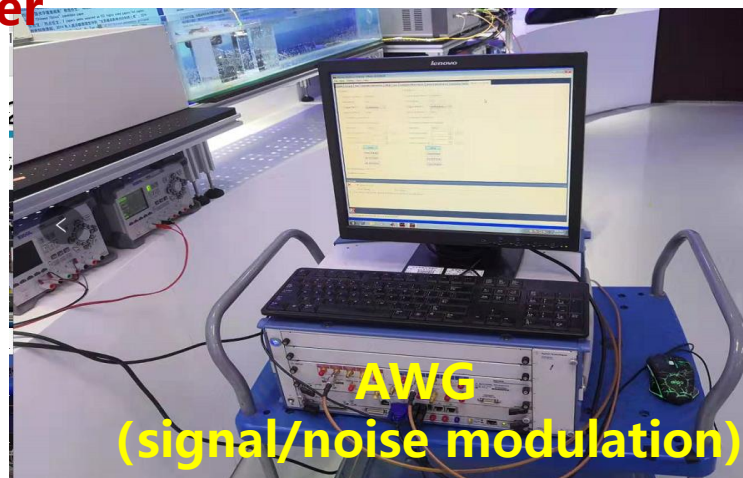
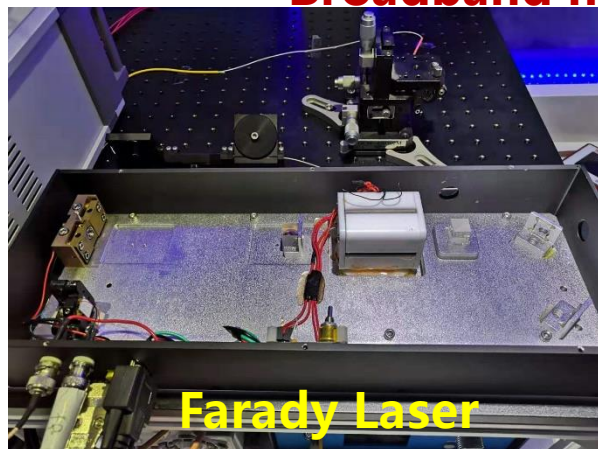


Zhang, J., et al., Background Noise Resistant Underwater Wireless Optical Communication Using Faraday Atomic Line Laser and Filter. Journal of Lightwave Technology, 2021. 40(1): p. 63-73.

2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信



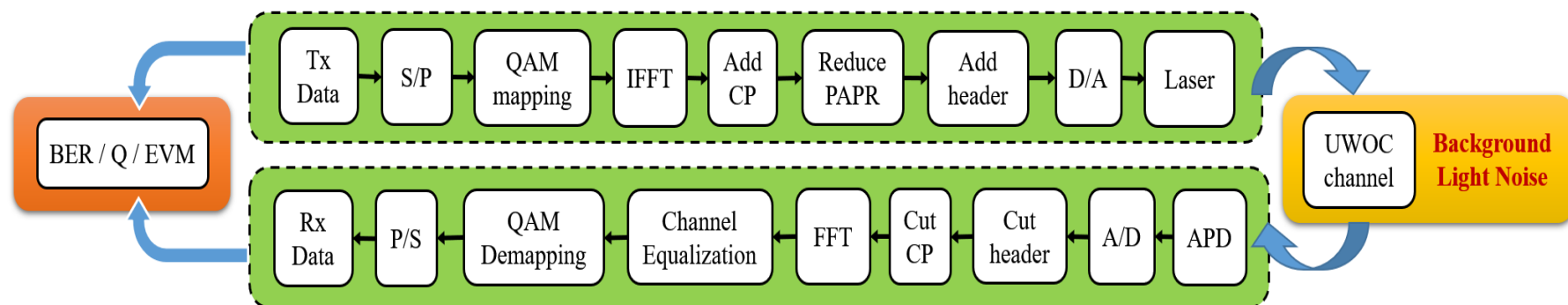
Broadband noise laser



2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信

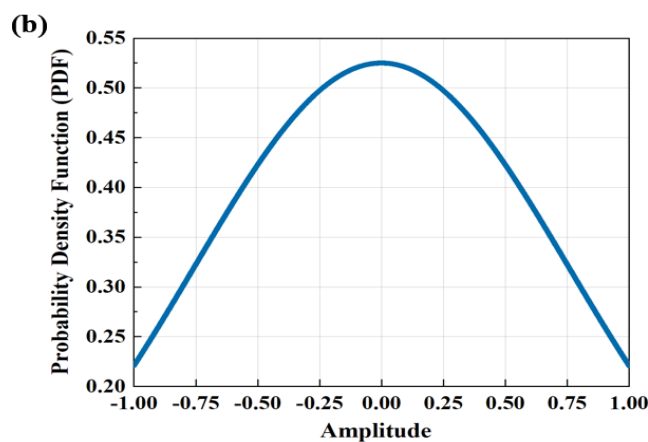
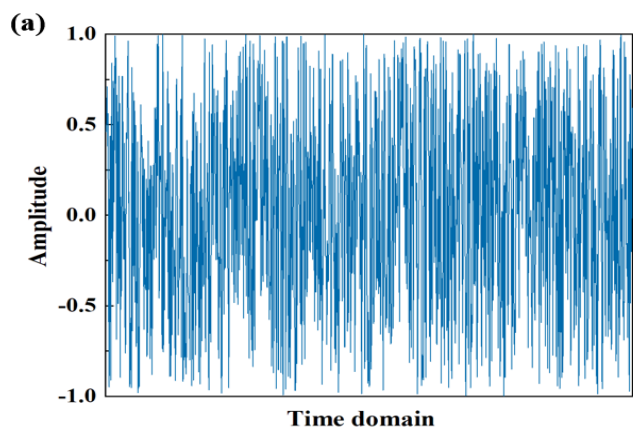
(c)

Offline Data Generation

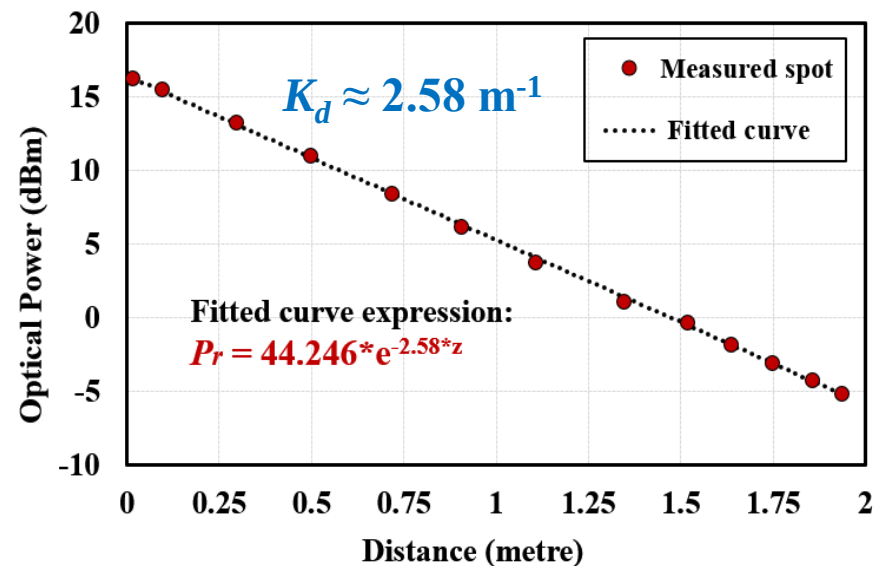


OFDM modulation
Signal bandwidth : 100MHz
Noise bandwidth: 1GHz

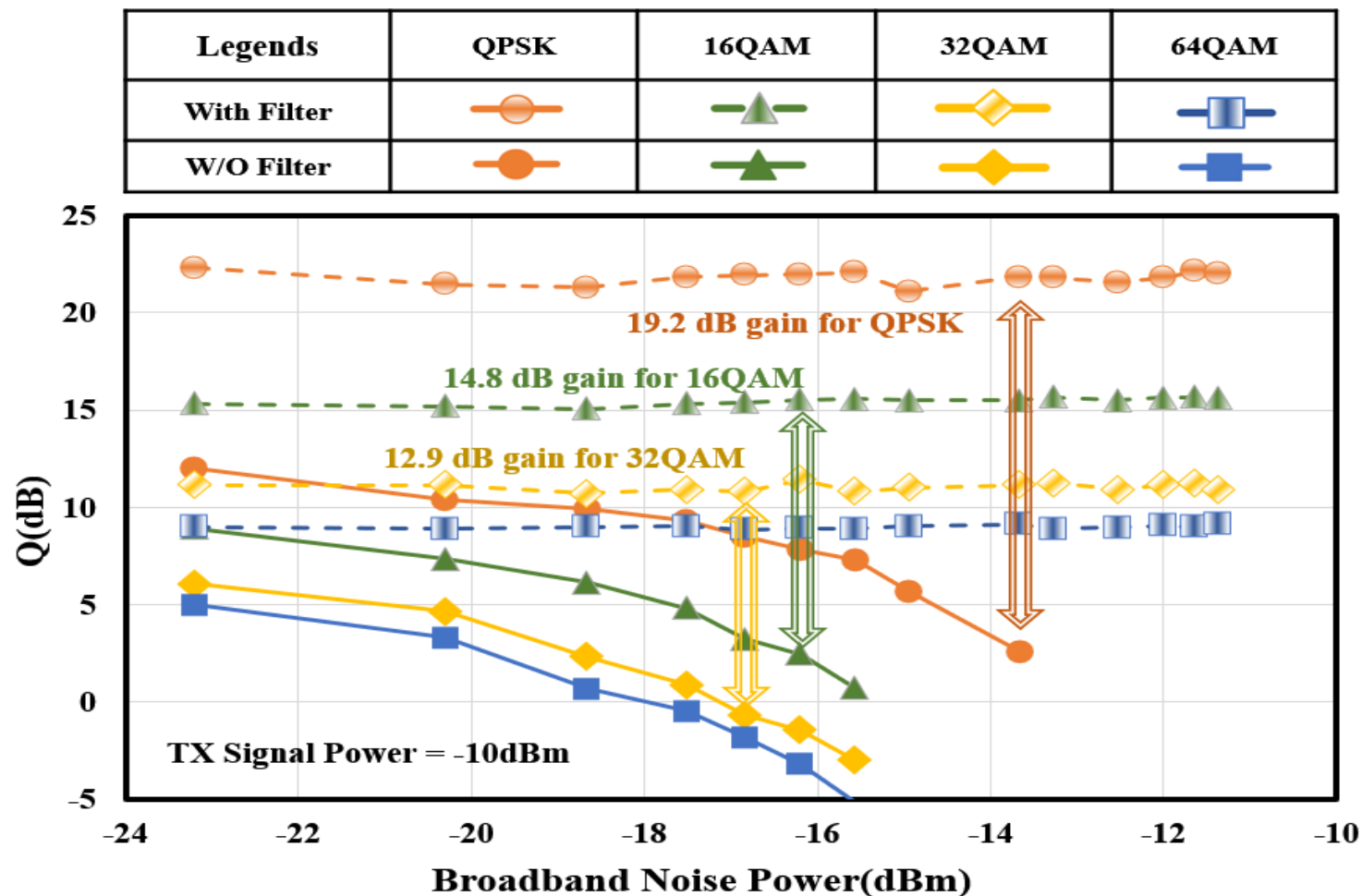
Offline DSP



The probability density function (PDF) of emulated noise follows the Gaussian distribution

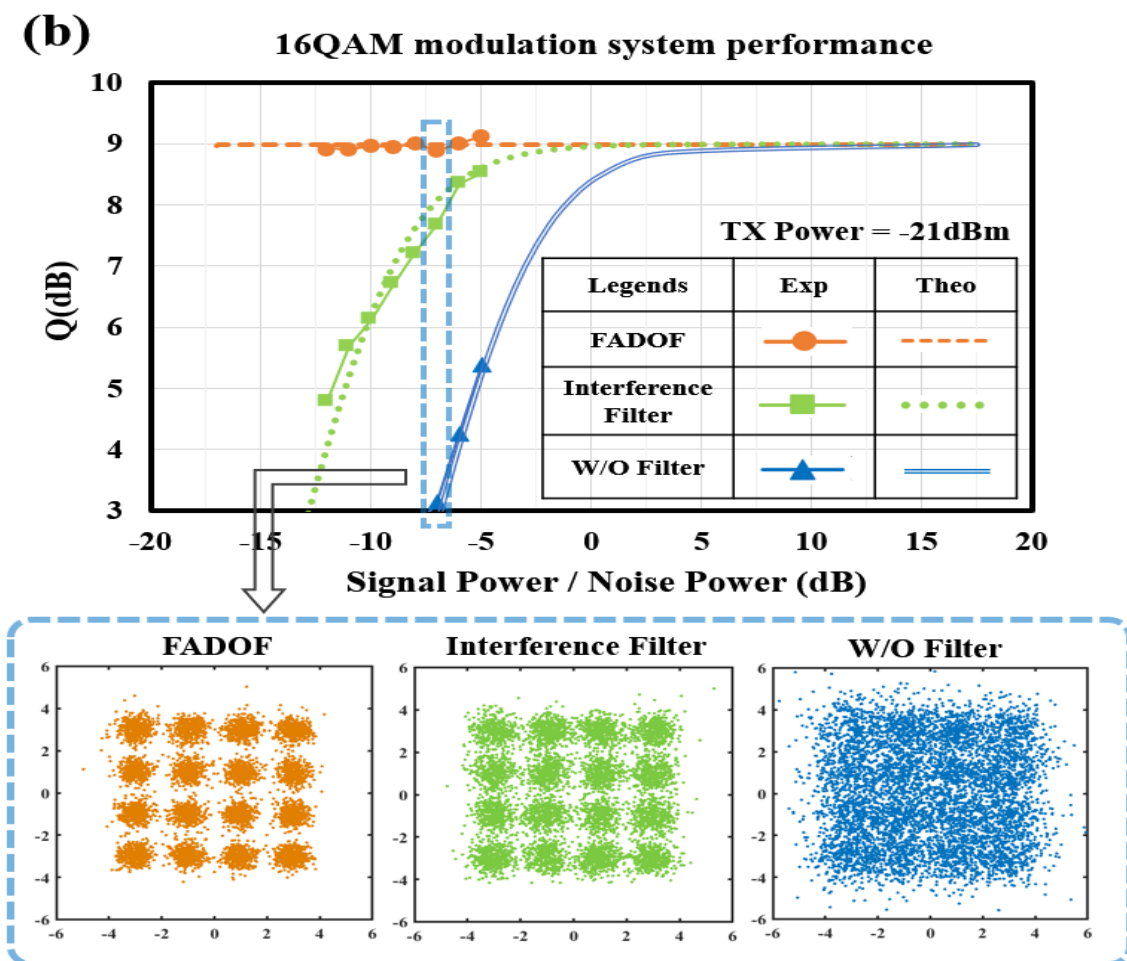
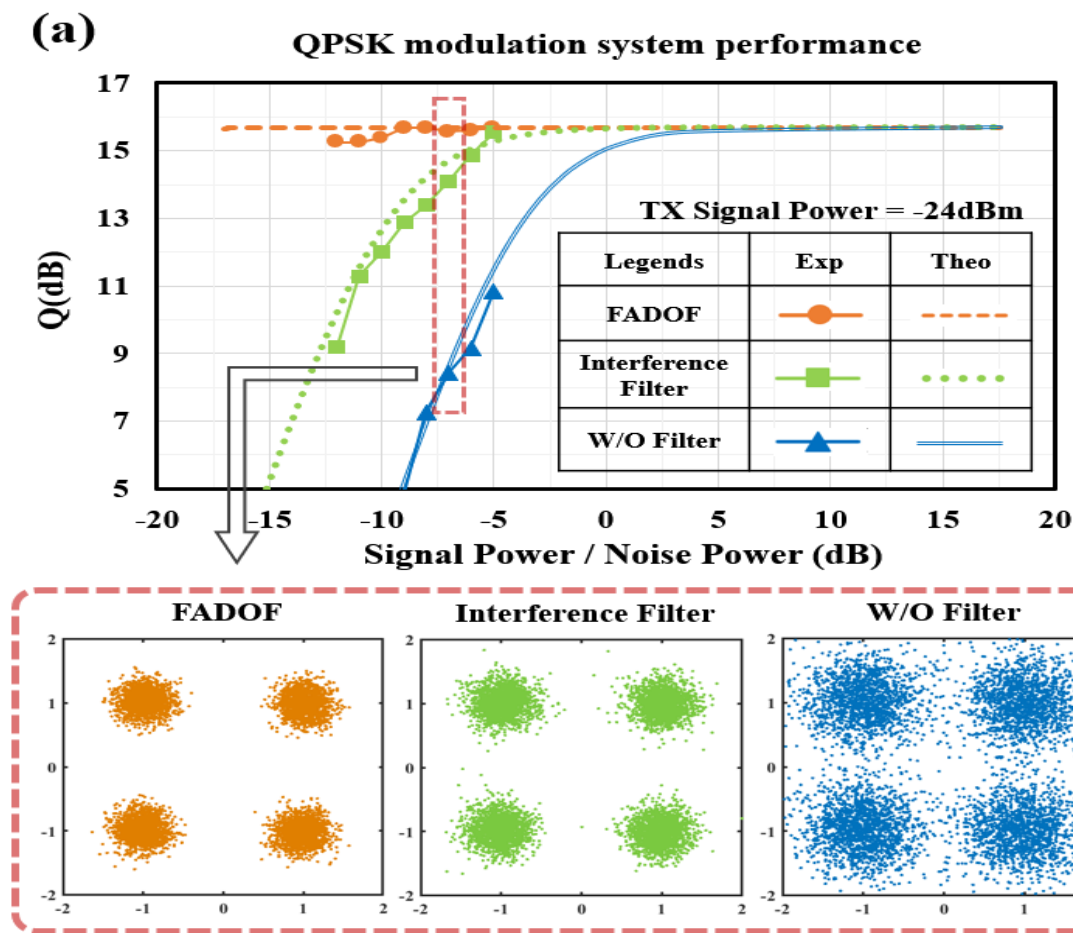


2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信



Q performance versus broadband light output power for different filter conditions and modulation types. The optical signal power is adjusted to a fixed -10dBm at the transmitter.

2、基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信



(a) Q performance versus the ratio of signal light power to noise light power with QPSK modulation (b) Q performance versus the ratio of signal light power to noise light power with 16QAM modulation. 'Exp' represents the experiment results. 'Theo' means the theoretical results. The optical signal power at the transmitter is adjusted to -24dBm for QPSK modulation and -21dBm for 16QAM modulation.

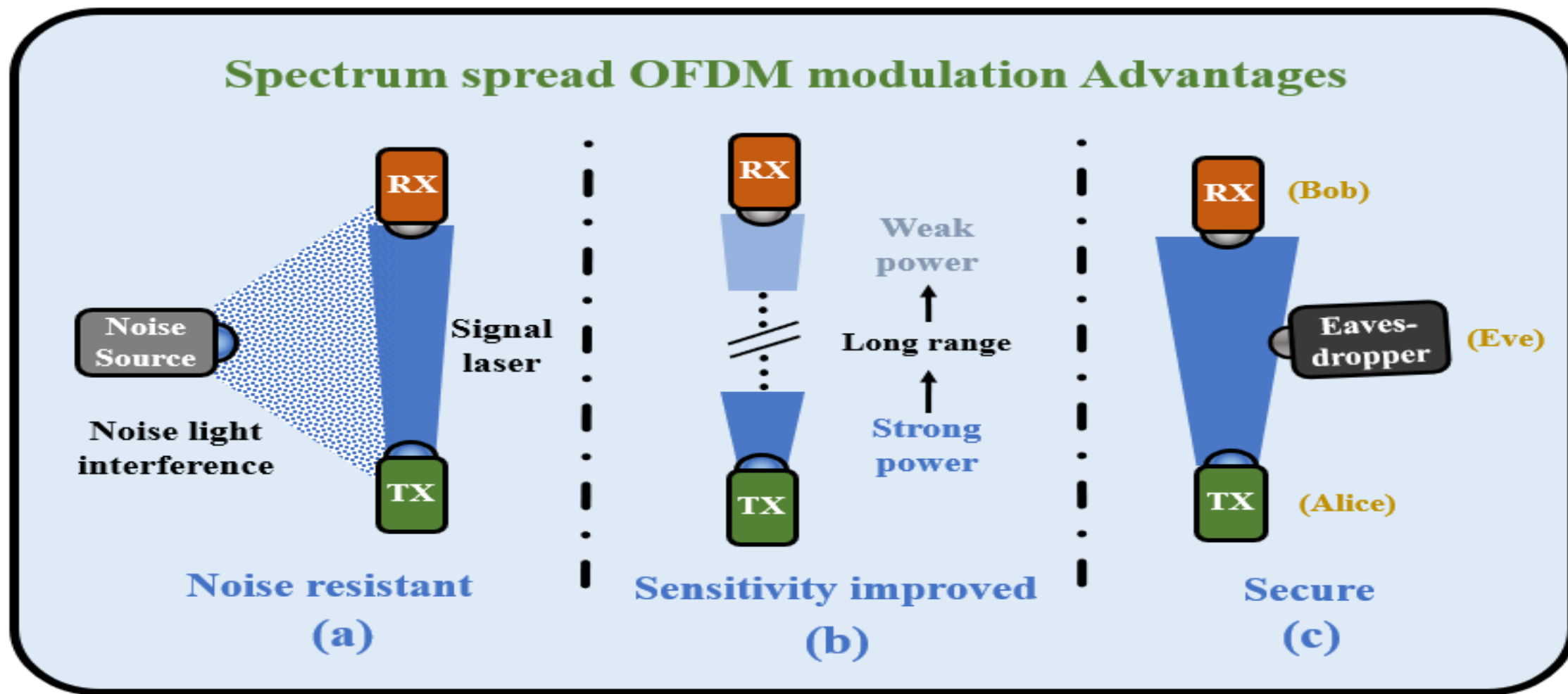
理论结果和仿真结果一致

提纲

1. 研究背景与研究动机
2. 基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信
3. 基于扩频加密OFDM的水下无线光通信
4. 水下无线光通信的大动态范围接收调控
5. 总结与讨论

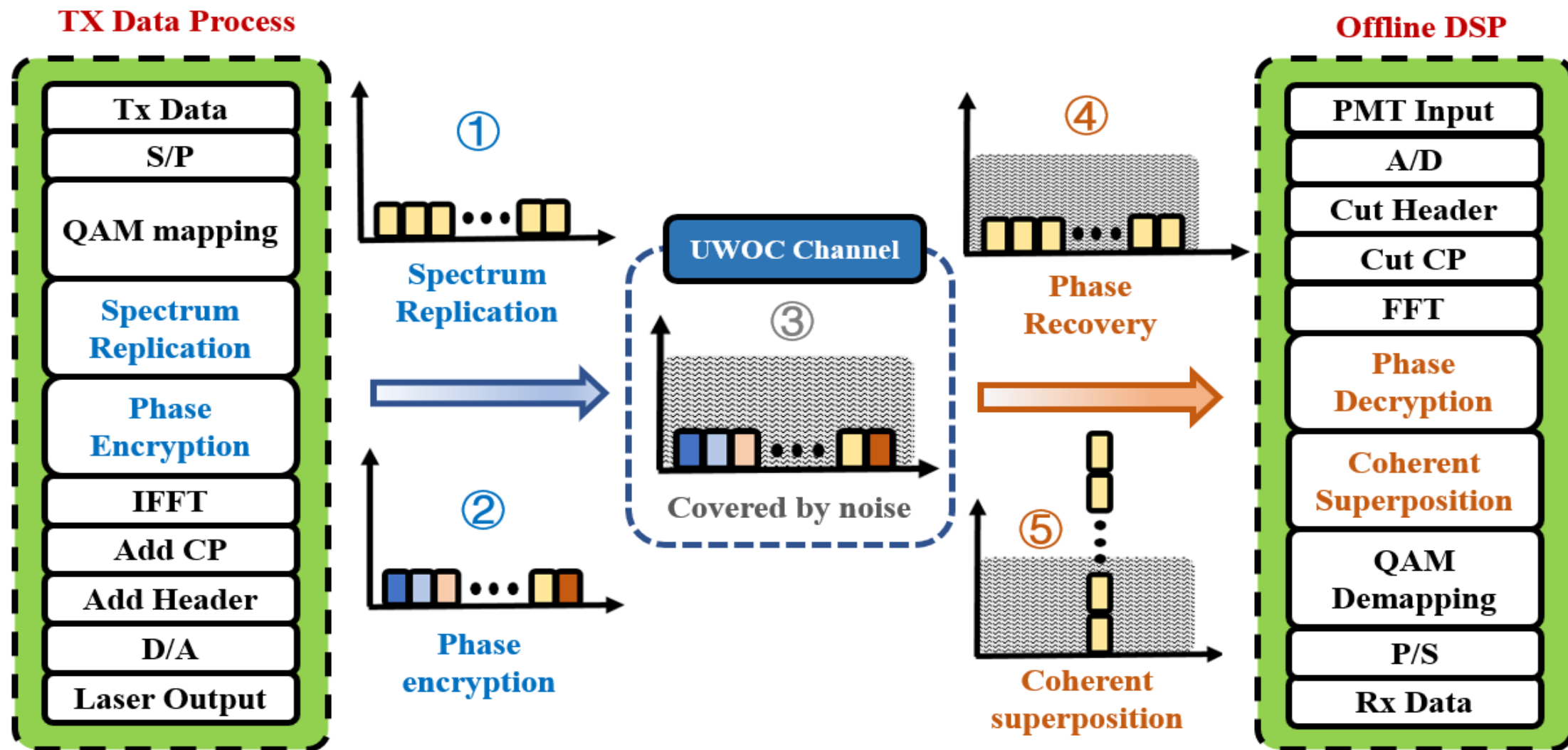


3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信

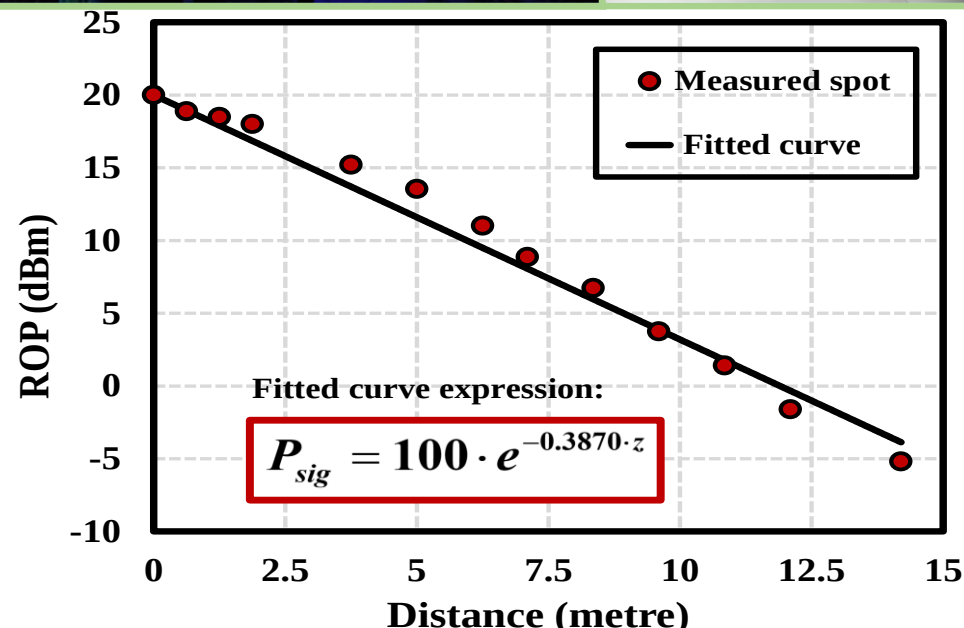
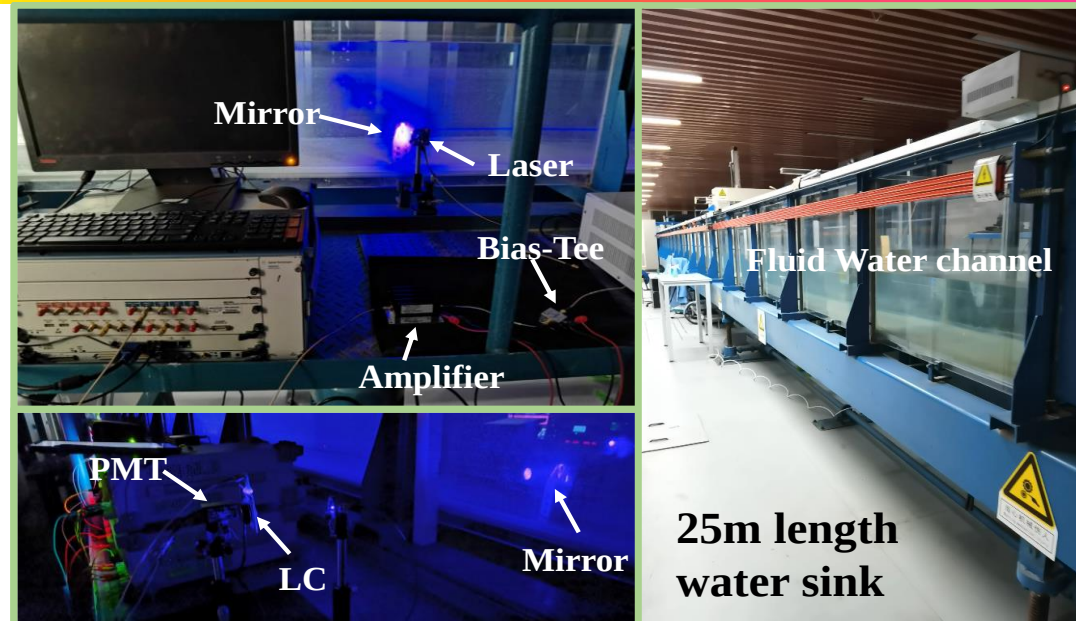
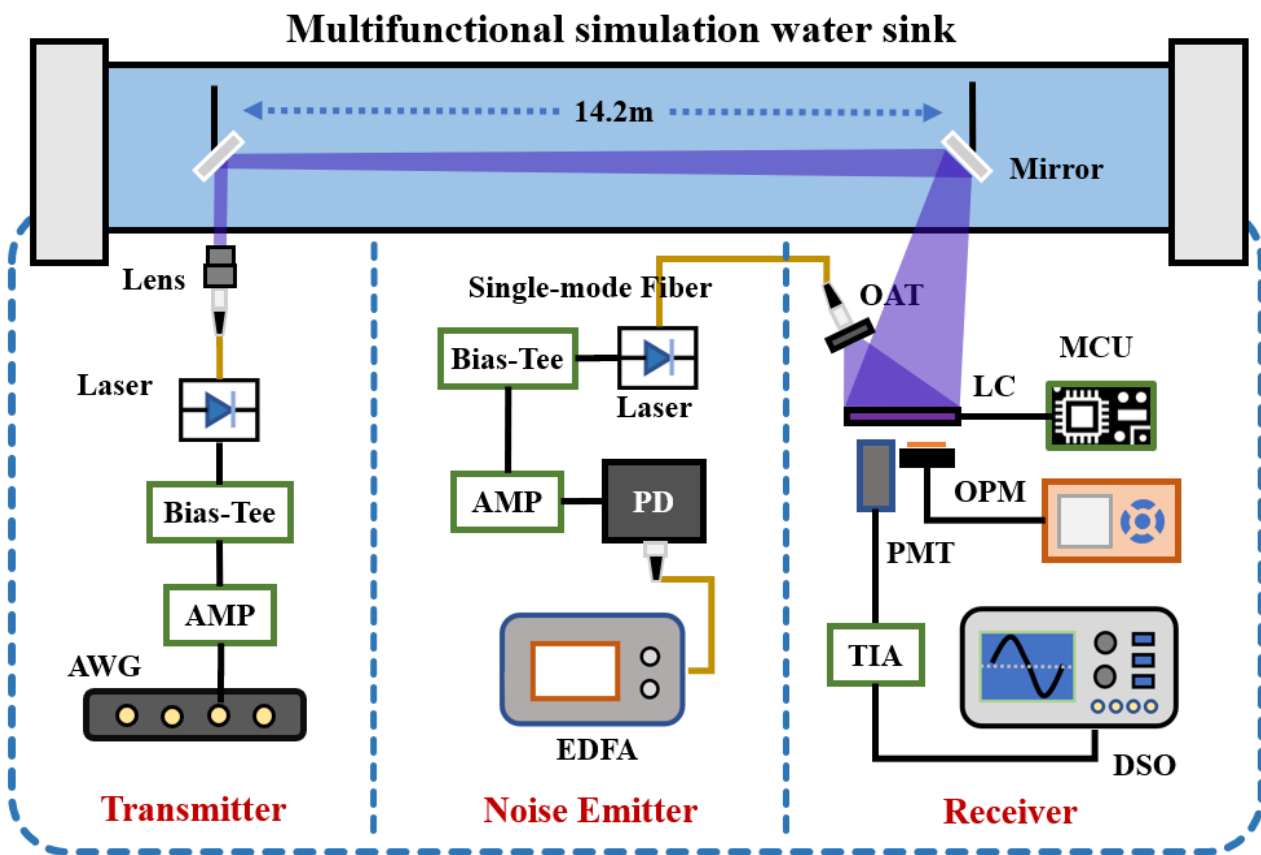


Secure and noise-resistant underwater wireless optical communication based on spectrum spread and encrypted OFDM modulation, OE 2022

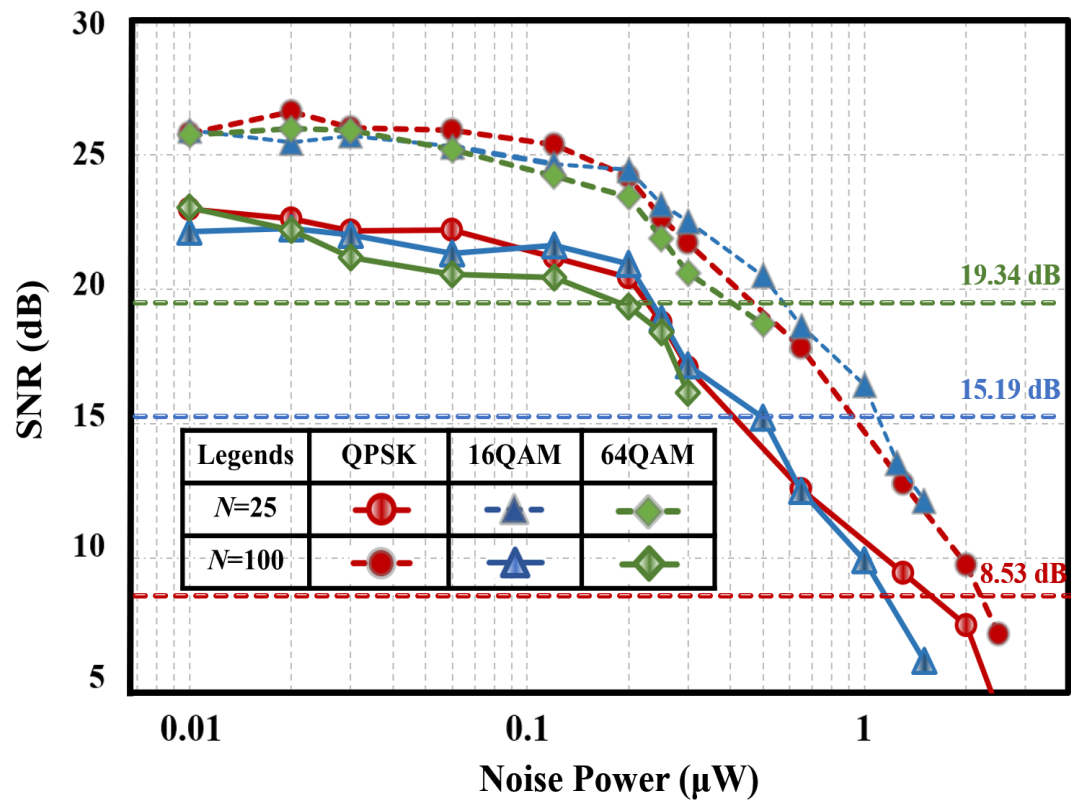
3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信



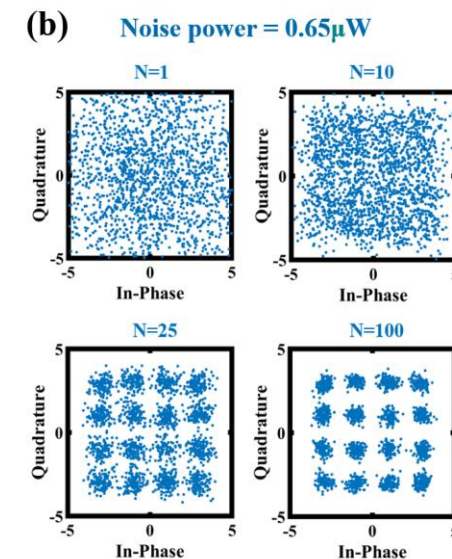
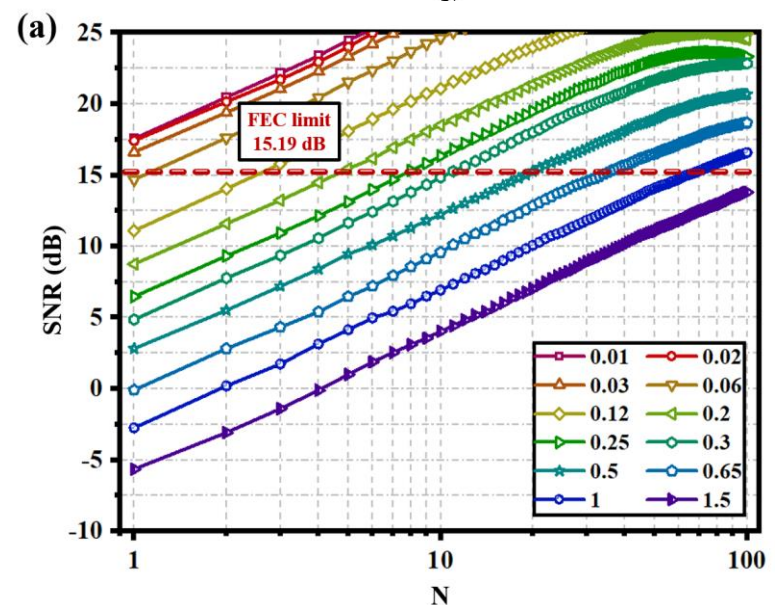
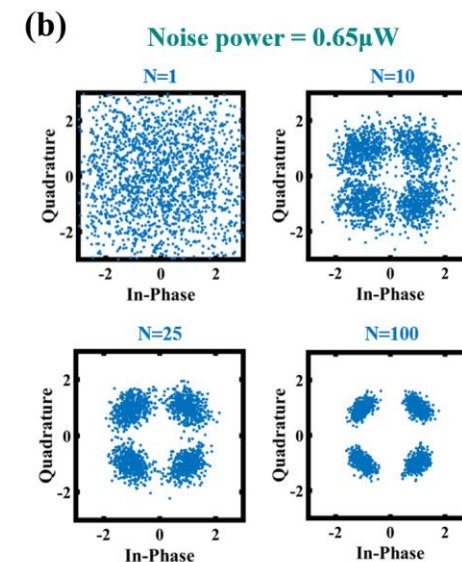
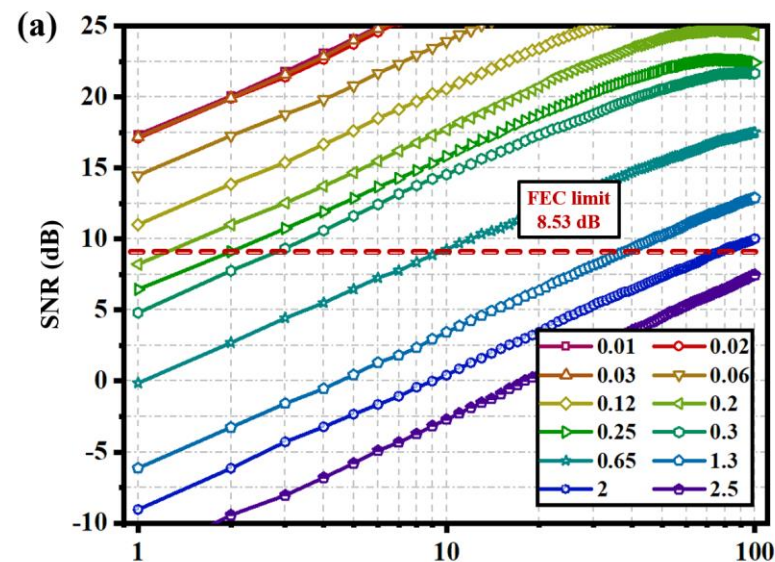
3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信



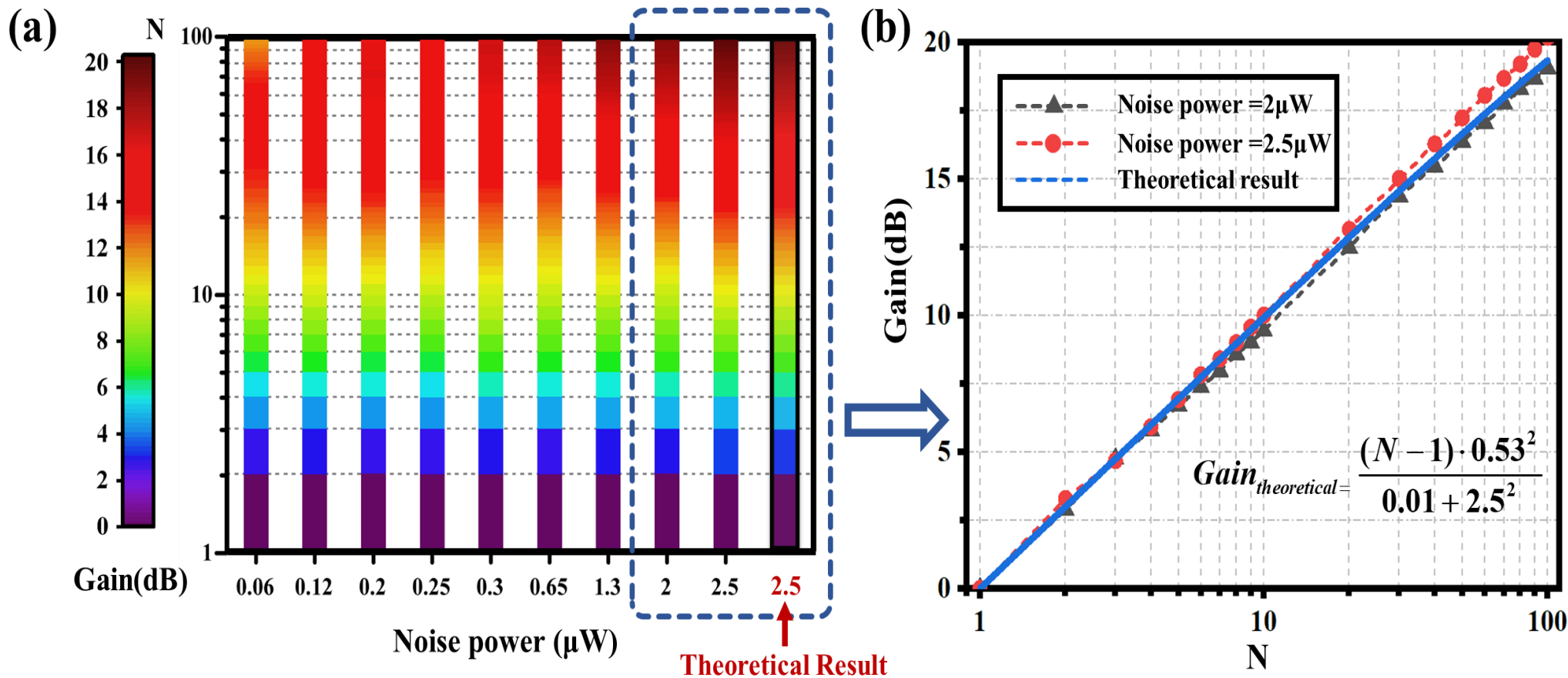
3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信



不同扩频因子下的接收端信噪比

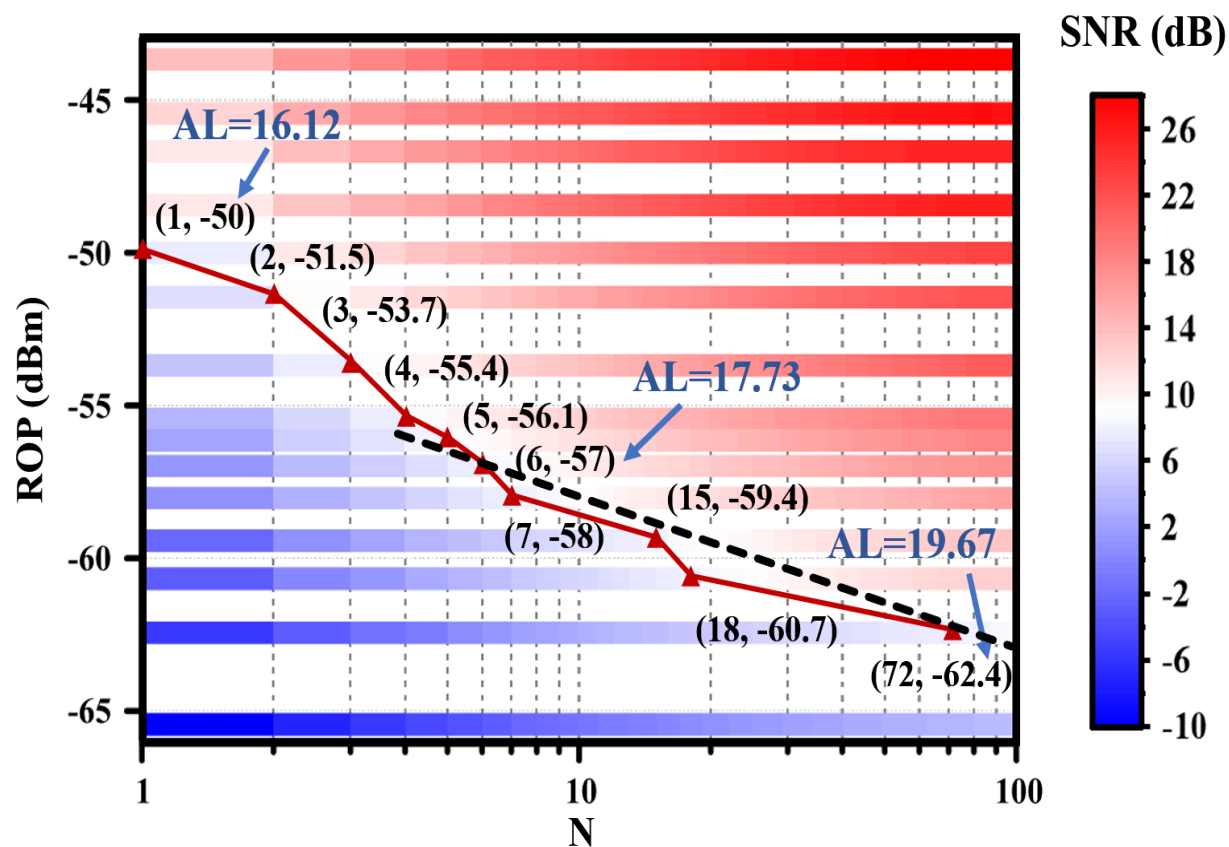


3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信

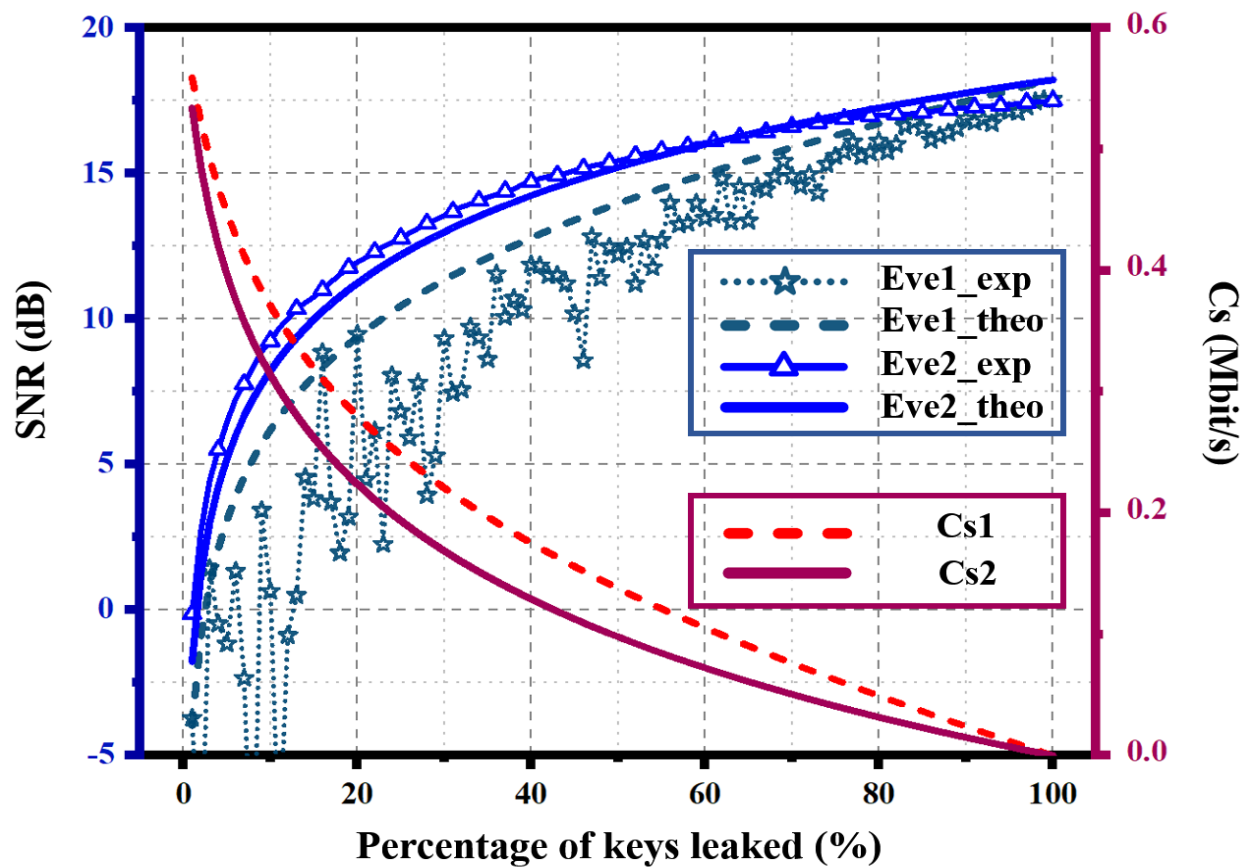


不同扩频因子下的信噪比改善收益

3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信

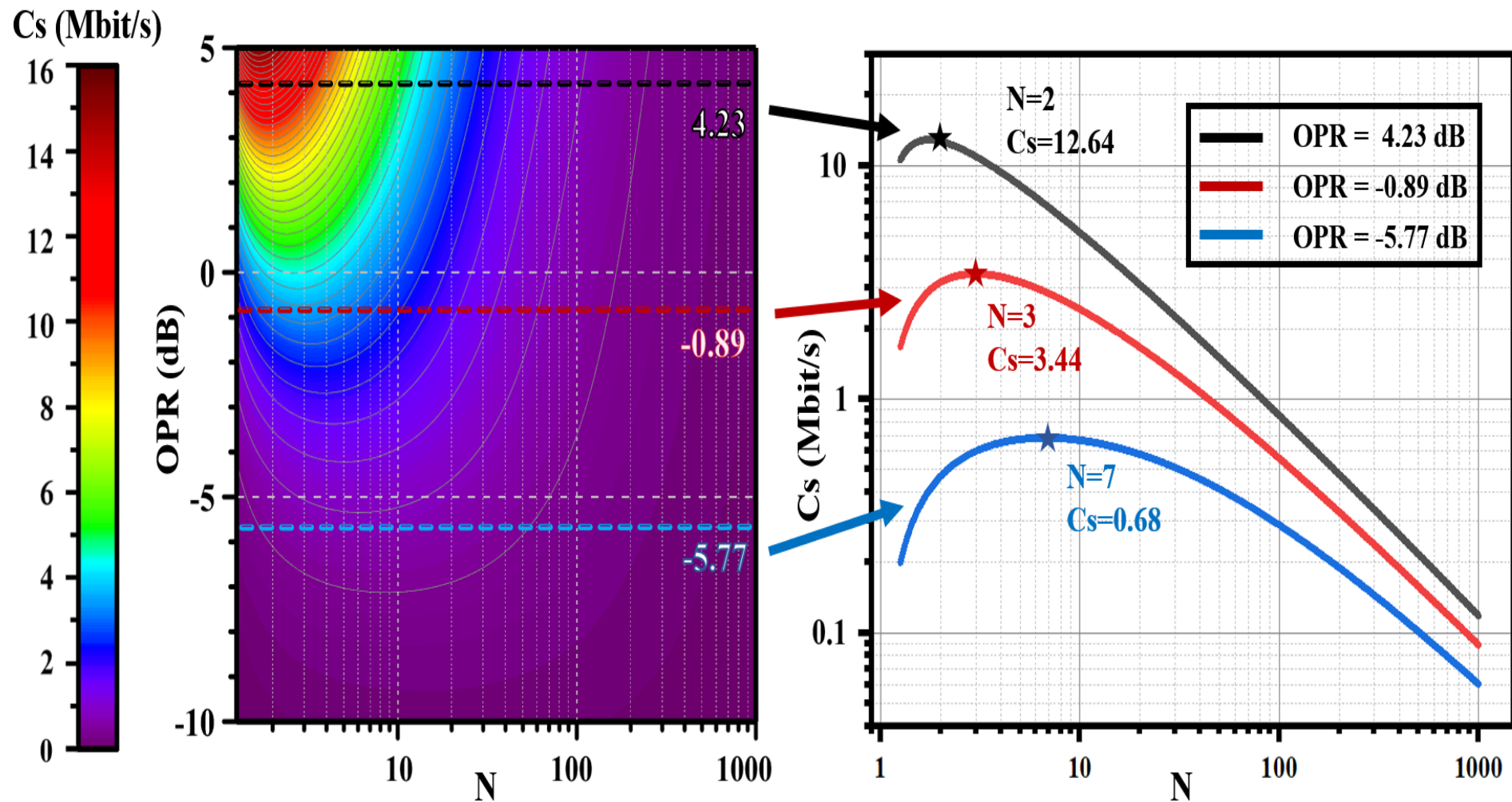


不同扩频因子下的接收端灵敏度

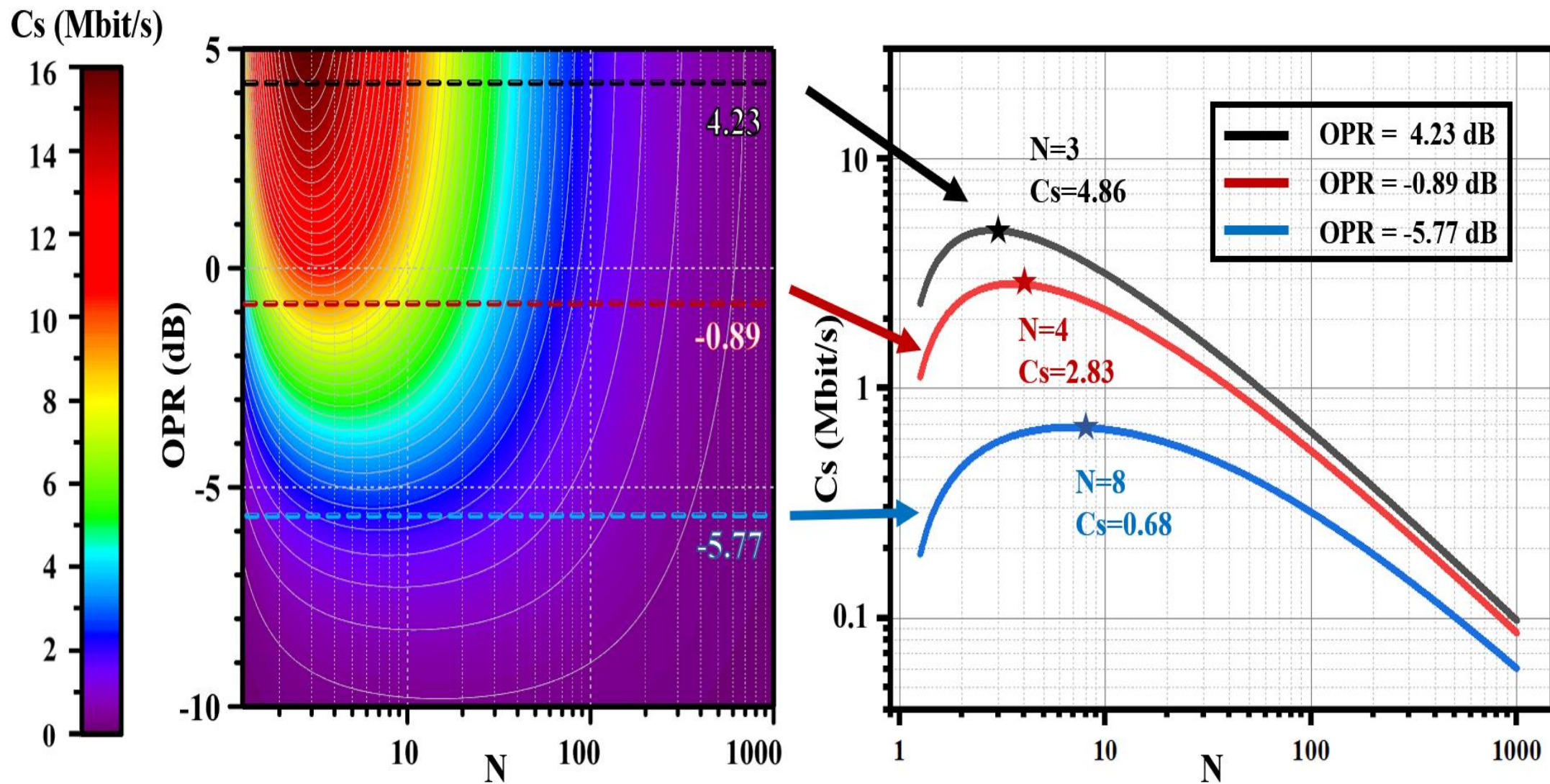


不同比例密钥泄露下Eve的信噪比和Bob的安全容量

3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信



3、基于扩频加密OFDM的水下无线光通信

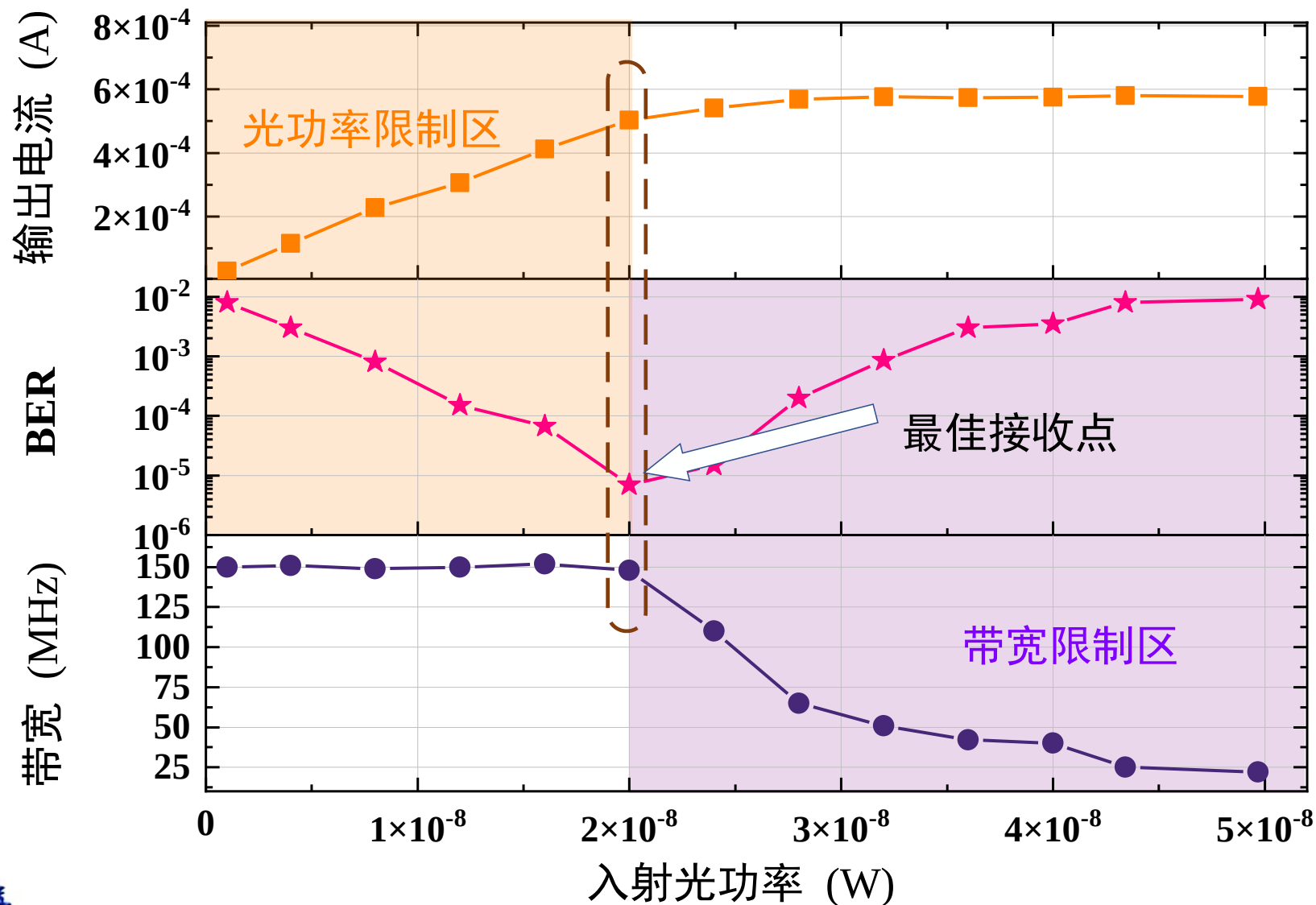


提纲

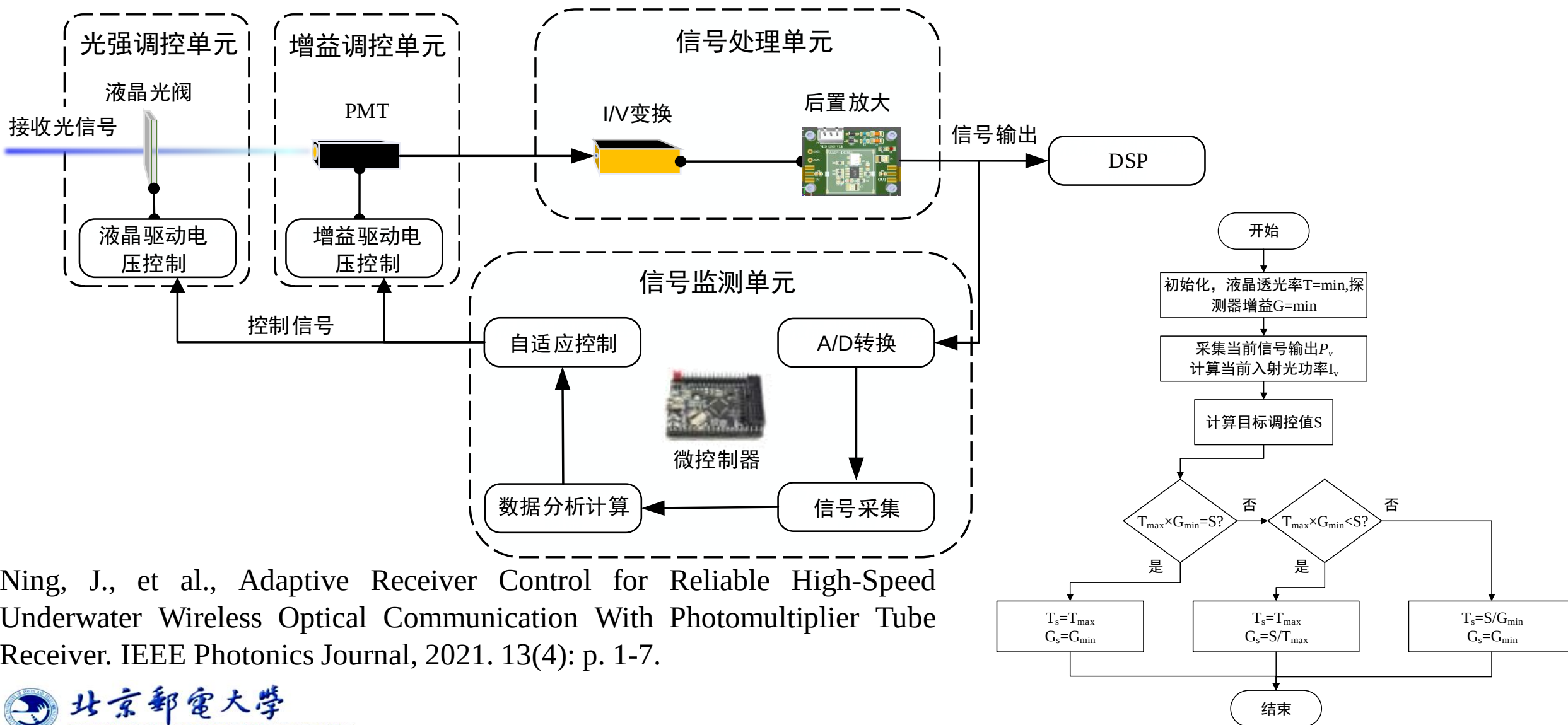
1. 研究背景与研究动机
2. 基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信
3. 基于扩频加密OFDM的水下无线光通信
4. 水下无线光通信的大动态范围接收调控
5. 总结与讨论



3、水下无线光通信的大动态范围接收调控



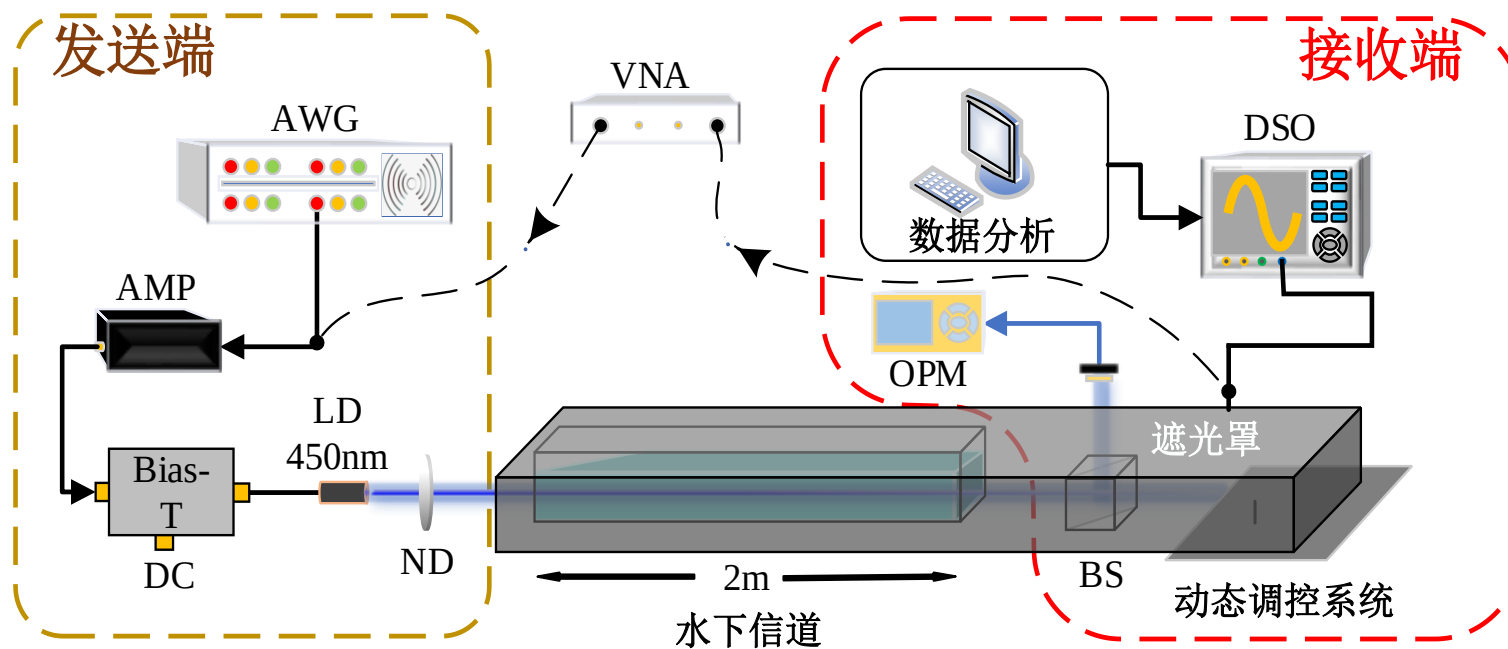
3、水下无线光通信的大动态范围接收调控



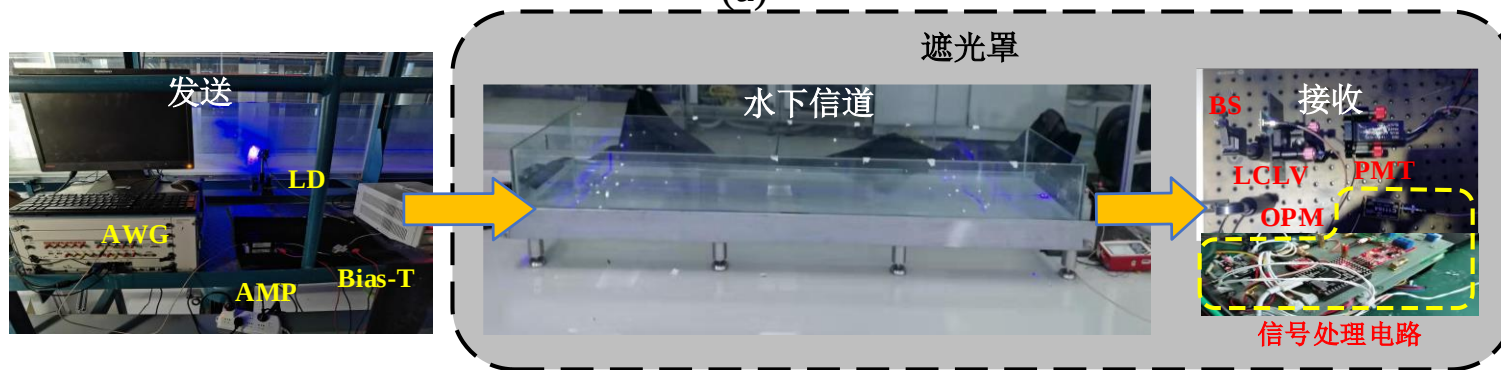
Ning, J., et al., Adaptive Receiver Control for Reliable High-Speed Underwater Wireless Optical Communication With Photomultiplier Tube Receiver. IEEE Photonics Journal, 2021. 13(4): p. 1-7.



3、水下无线光通信的大动态范围接收调控

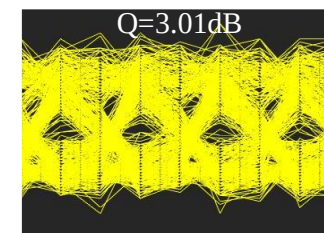
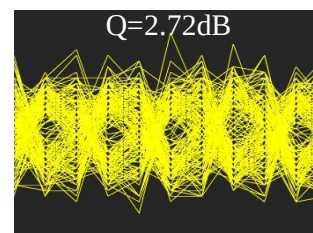
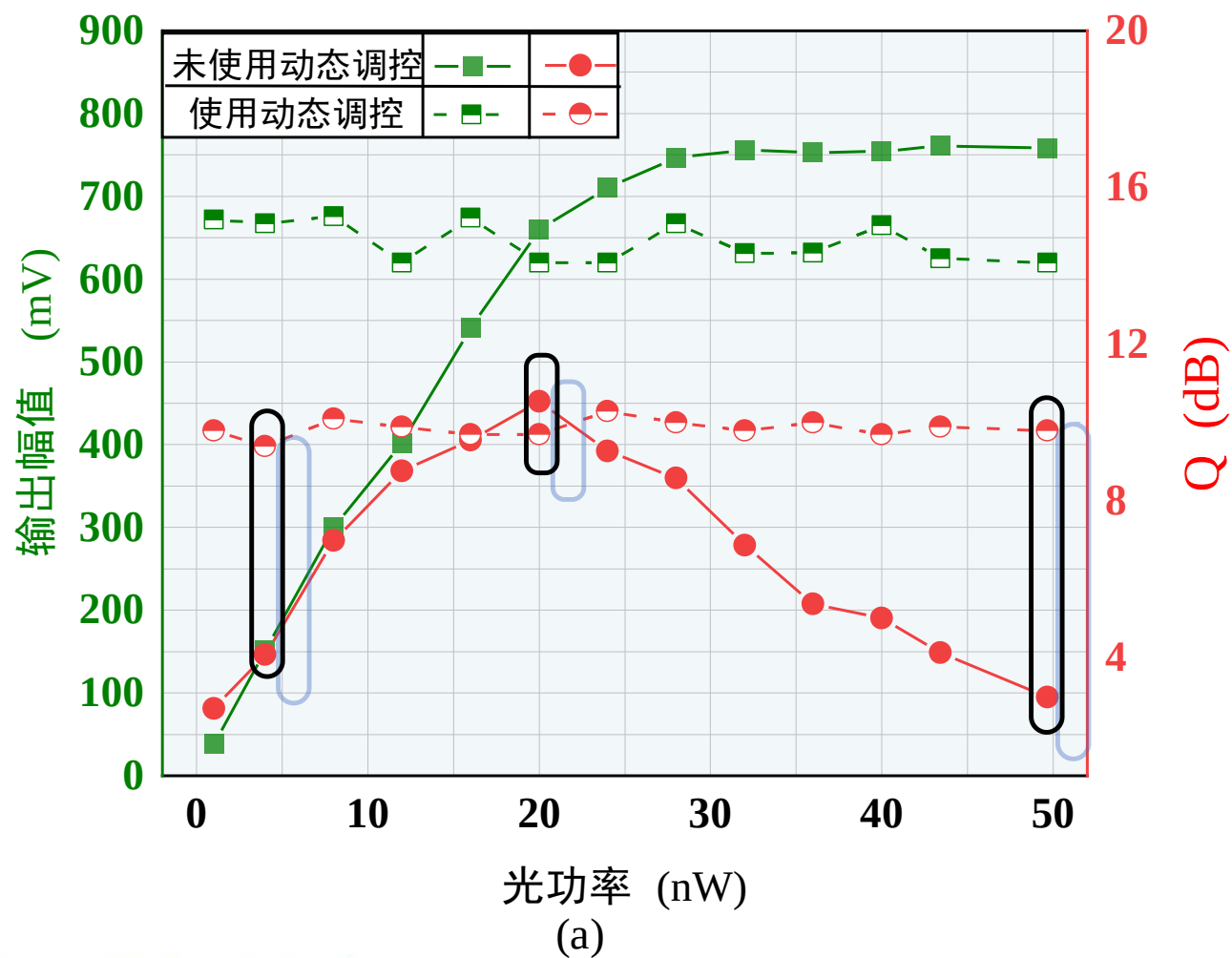


(a)



(b)

3、水下无线光通信的大动态范围接收调控

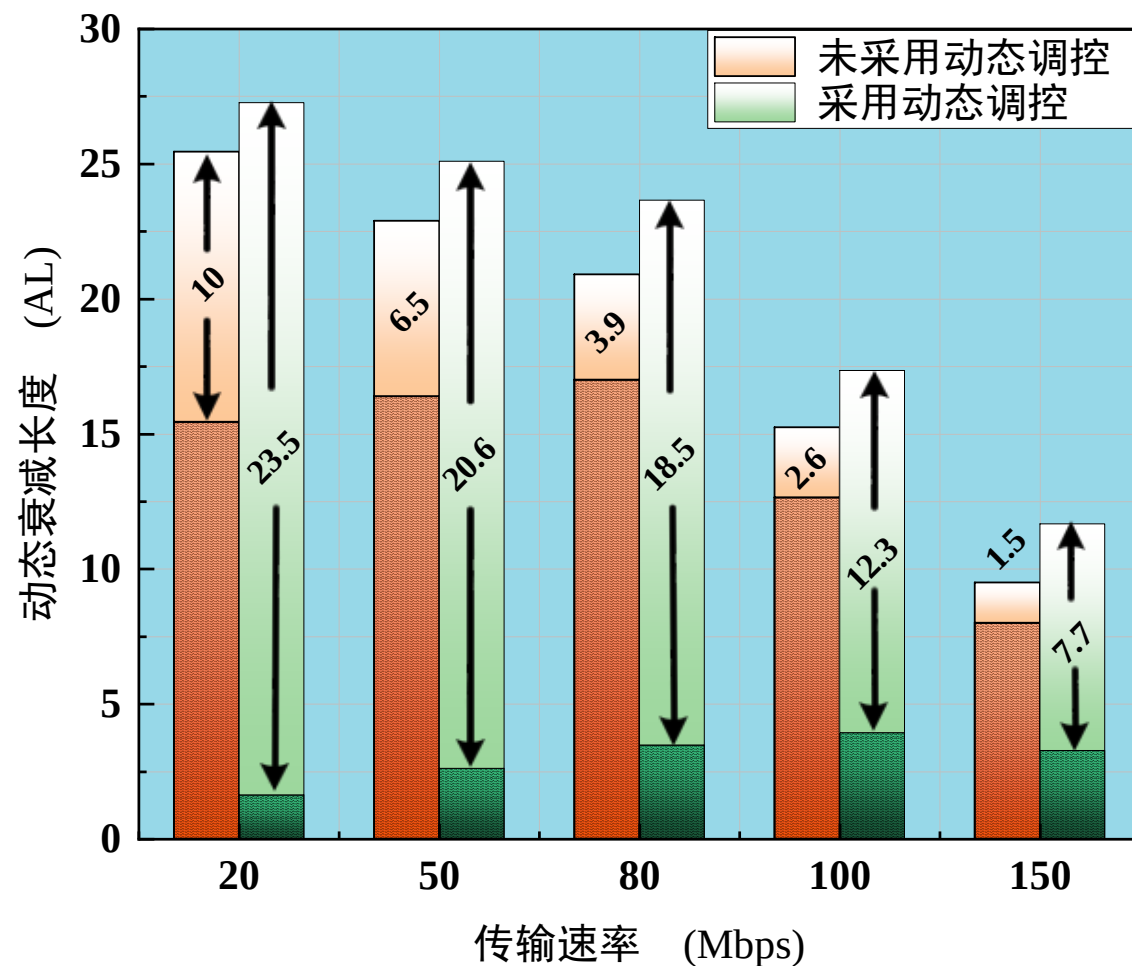
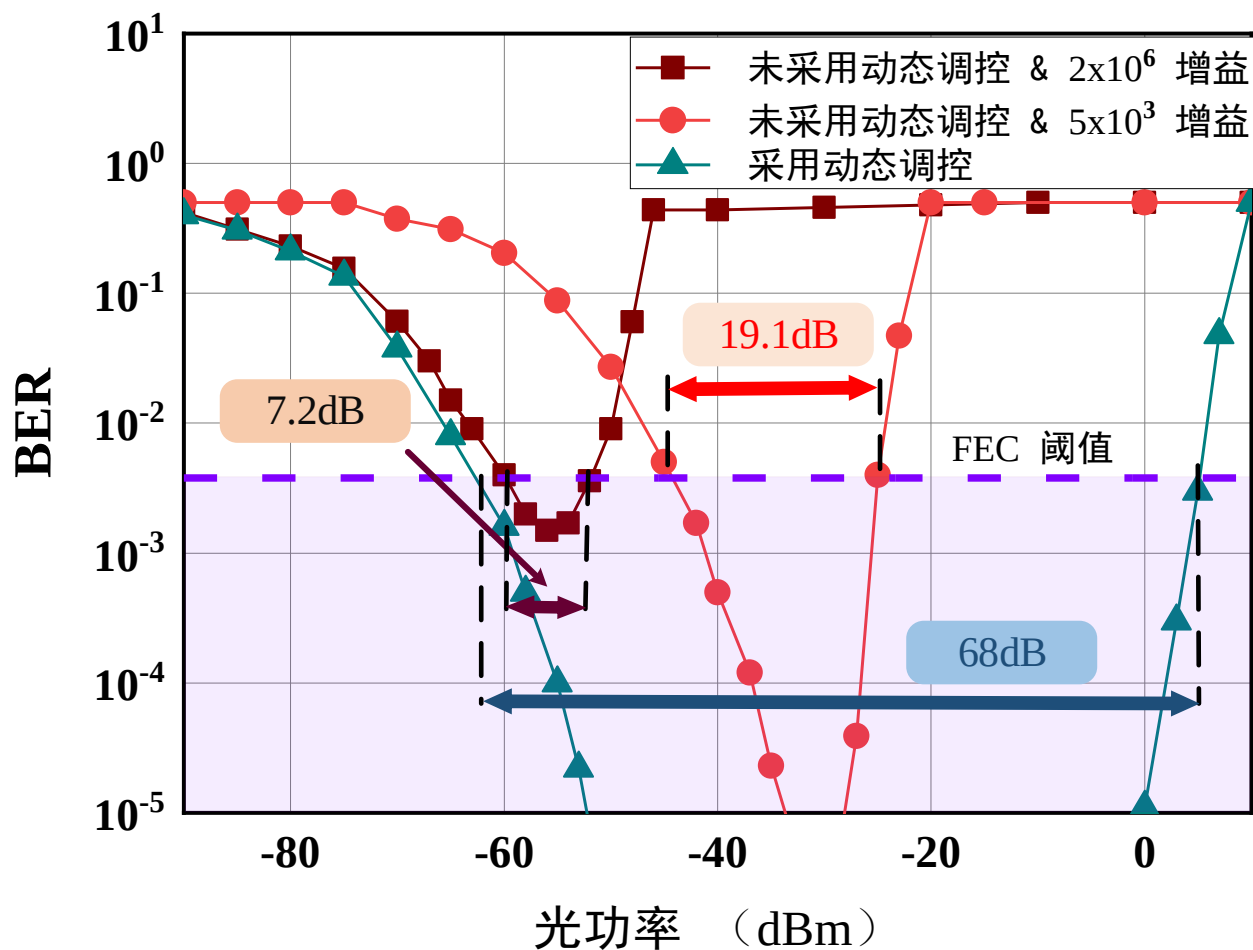


(b)



(c)

3、水下无线光通信的大动态范围接收调控



4、研究总结与讨论

✓ 国内多个单位学者专家做了大量深入工作，水下无线光通信速率和距离不断突破

中国科技大学、浙江大学、复旦大学、中科院上海光机所、中科院西安光机所、广东鹏城实验室、长春理工大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉大学、南京邮电大学、大连理工大学、西安邮电大学和沙特阿拉伯国王大学等

✓ 复杂信道环境下的背景光干扰、大动态功率波动和信道安全不可忽视

- **基于原子滤光的水下无线光抗干扰通信**：建立了环境背景光干扰对不同水质水下无线光通信系统性能影响的理论解析模型，并在**法拉第原子滤光和干涉滤光**等不同滤波条件下进行了实验验证，理论结果和实验结果完全一致 (JLT 2022, 40(1) p. 63-73)
- **基于扩频加密 OFDM 的水下无线光通信**：1) 带内背景光干扰下QPSK信号**信噪比提升19.04dB**(扩频因子100倍)；2) 接收灵敏度从-50dBm提升至-62.4dBm，**可容忍链路衰减长度达到19.67**；3) 验证了即使在密钥被Eve部分破解的条件下，该方案仍然可有效的实现**物理层信息安全** (Eves信噪比-3.72dB, Bob信噪比17.56dB)。在背景光干扰、浑浊强散射和动态流动水槽环境下的实验结果和理论结果一致 (OE 2022已接收)
- **水下无线光通信的大动态范围接收调控**：分析了高灵敏度PMT接收机的接收非线性效应，提出了基于液晶光阀和接收增益联合优化的自适应调控策略，实验结果表明该方案可将100Mb/s水下蓝绿光信号的接收动态范围扩展到68dB(-63dBm至5dBm) (PJ 2021. 13(4): p. 1-7)



感谢批评指正！

