



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

水下光通信信道建模技术研究

易 湘

西安电子科技大学

通信工程学院

yixiang@xidian.edu.cn

15829635333



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

目录

1

研究背景与意义

2

研究现状与挑战

3

技术路线与分析

4

工作总结与展望



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

1.1 无信道 不通信

有线或无线

通用或特种

地面或空天海

狭义信道 (物理)

载波

电、光
声、磁

传播

传输媒介

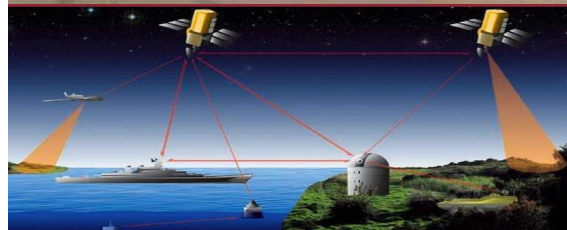
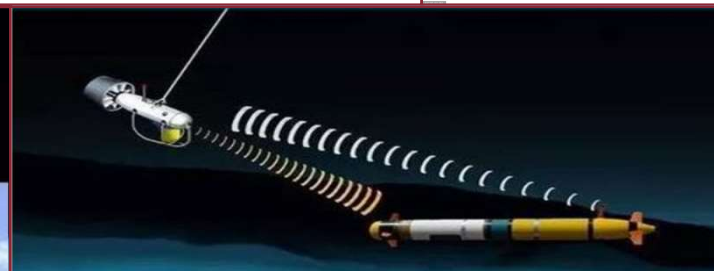
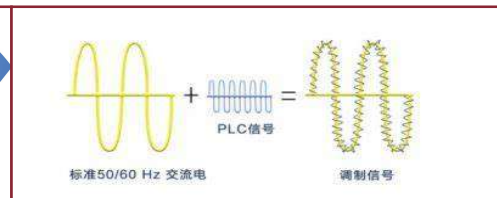
光纤、电缆
大气、海水

决定

广义信道 (数学)

通信端机设计

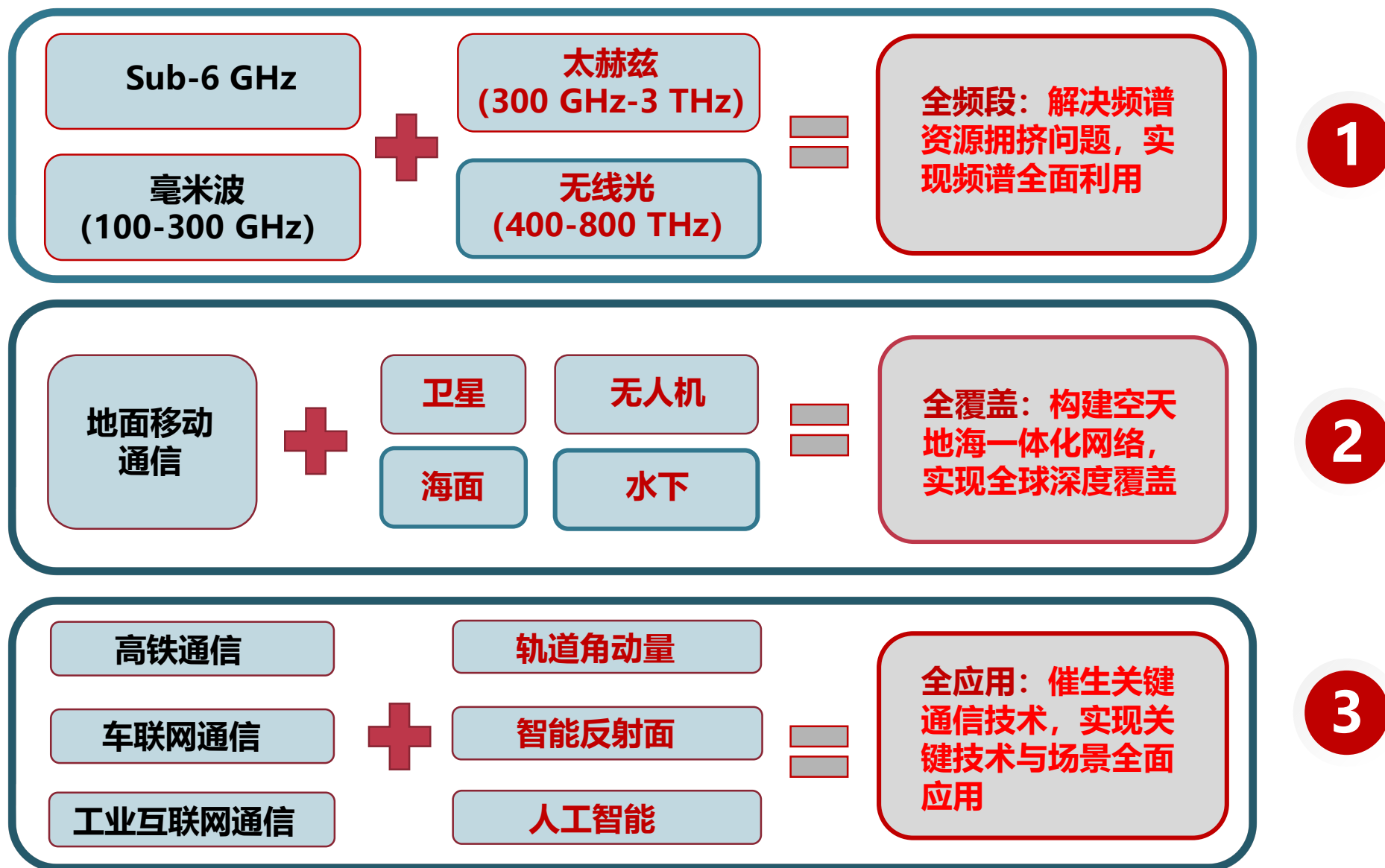
器件、调制、编码
同步、差控、协议





西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

1.2 6G全频段全场景信道建模需求





西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

目录

1

研究背景与意义

2

研究现状与挑战

3

技术路线与分析

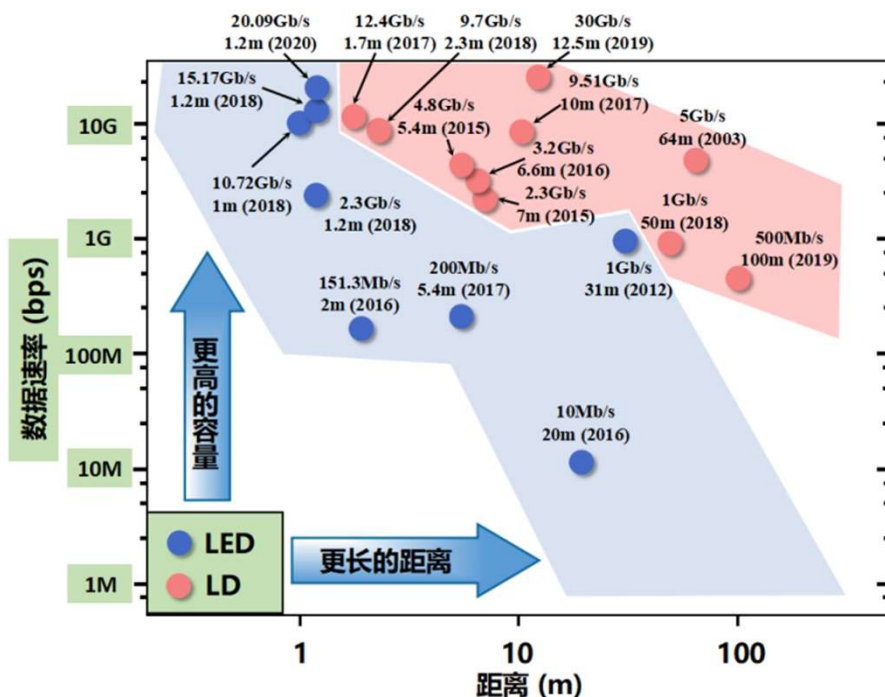
4

工作总结与展望



2.1 水下光通信系统研究现状

非实时单工通信系统（提升速率）：码率~Gbps 距离~10m



组织	年份	光源	调制格式	距离(m)	数据速率
华盛顿大学	2008	LD	4PAM	等效50	1 Gb/s
阿卜杜拉国王大学	2015	LD	NRZ-OOK	7	2.3 Gb/s
克莱姆森大学	2016	LD	OAM-OOK	2.96	3 Gb/s
阿卜杜拉国王大学	2015	LD	16QAM-OFDM	5.4	4.8 Gb/s
浙江大学	2017	LD	OFDM	10	9.51 Gb/s
复旦大学	2018	LD	NRZ-OOK	2.3	9.7 Gb/s
台湾大学	2018	LD	OFDM	1.7	14.8 Gb/s
国立台北科技大学	2019	LD	PAM4	12.5	30.0 Gb/s

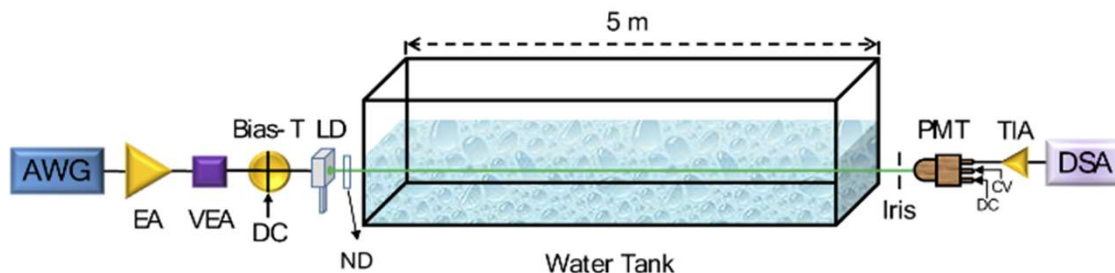
复旦大学	2017	LED	NRZ-OOK	5.4	200 Mbps
复旦大学	2018	LED	GS16QAM	1.2	2.3 Gb/s
复旦大学	2019	LED	bit-loading-DMT(OFDM)	1.2	15.17 Gb/s
复旦大学	2020	LED	PS-bit-loading-DMT(OFDM)	1.2	20.09 Gb/s

LD光源

传输距离远，速率高，需对准

LED光源

视场角大，非相干，动中通

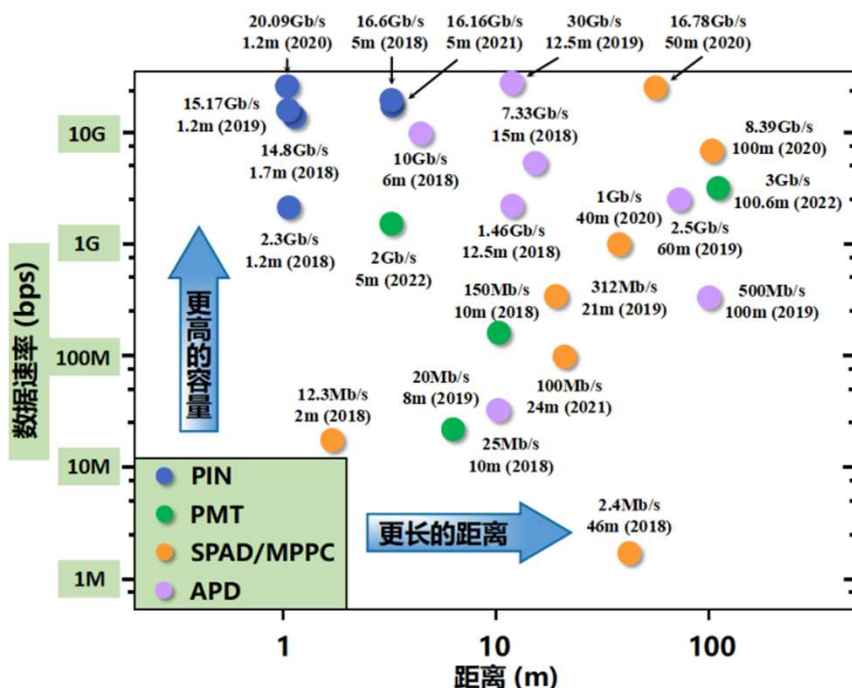


受限于电域处理能力，数据以录播方式离线发送和接收



2.1 水下光通信系统研究现状

非实时单工通信系统（提升距离）：码率~Mbps 距离~100m



组织	年份	调制格式	光电探测器	距离 (m)	数据速率	信道
浙江大学	2018	4-PPM	MPPC	46	5Mb/s	自来水
浙江大学	2018	PAM-4	MPPC	2	12.3Mb/s	自来水
浙江大学	2019	32-QAM OFDM	MPPC	21	312Mb/s	自来水
浙江大学	2020	OOK	MPPC	50	16.78Mb/s@50m	自来水
鹏程实验室	2020	OOK	MPPC	40	1Gb/s	Maa lox
香港中文大学	2021	OOK	SPAD	24	100Mb/s	Maa lox

台湾工业技术研究院	2018	OFDM	PMT	10	150 Mb/s	海水
西安光机所	2019	OOK	PMT	8	19 Mb/s	自来水
浙江大学	2022	OOK	PMT	100.6	3 Gb/s	自来水

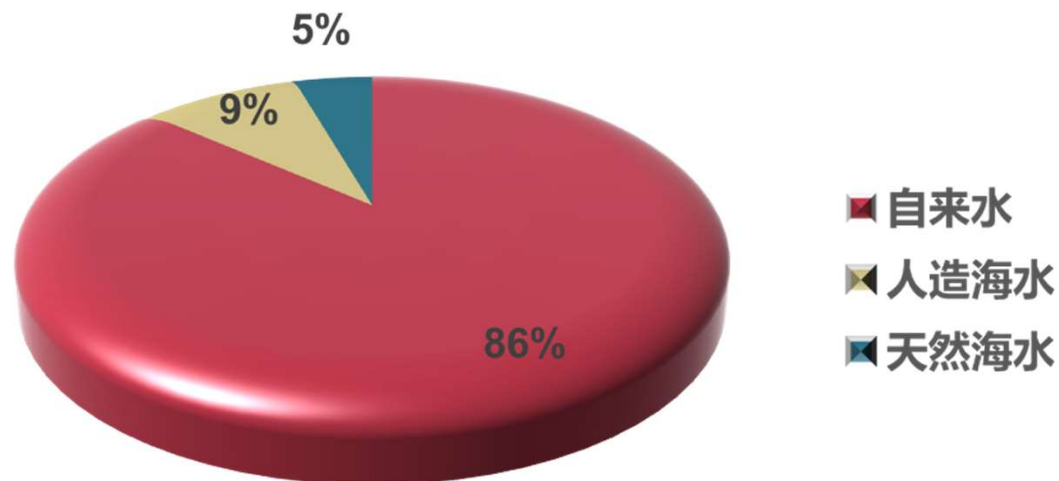
参数	PIN	APD	PMT	SiPM/MPPC
增益	1	~10 ²	~10 ⁶	~10 ⁶
偏置电压	低	高	非常高	低
温度敏感度	低	高	低	高
响应波段	红外	红外	蓝/紫外	蓝
3dB带宽	高	高	高	低
磁场敏感度	不敏感	不敏感	敏感	不敏感
噪声水平	低	中等	低	中等
外形紧凑度	紧凑	紧凑	笨重	紧凑

适用中远
距离水下
通信



2.2 水下光通信系统信道总结

■ 水下光通信系统信道使用统计



■ 面临的问题

- 多以自来水为模拟信道，与海水成分相去甚远
- 多以静置在水槽/水管/泳池中的水体为模拟信道，与动态起伏的海洋环境不符
- 缺乏统一的标准化信道模型，难以对实验结果做公平比较



2.3 水下光通信信道建模挑战

■ 海水信道——吸收、散射和湍流



■ 水下信道建模关键挑战

- 实施信道测量所需的条件、成本、周期都比室内、大气、自由空间更难
- 遍历不同海域、不同海深、不同海况的信道测量难以保证数据的可靠性
- 一些信道测量传感器不具备，如小角度的散射相函数、盐度引起的小尺度折射率起伏等
- 不可直接套用其它频段、其它场景下的信道模型 ✖

在缺少测量数据集的情况下，最好的办法就是通过数值模型来进行模拟



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

目录

1

研究背景与意义

2

研究现状与挑战

3

技术路线与分析

4

工作总结与展望



3.1 海水成分与吸收散射

海水成分			吸收	散射	水体
溶解物 ($<0.4\mu\text{m}$)	无机物	溶解盐	可见光 (忽略) 紫外光 (略增) 厘米波 (激增)	较纯水增加 30% 瑞丽全向散射	纯海水
	有机物	CDOM 黄色物质	蓝紫光 (明显) 红光 (较少)		沿海水* 海洋中部
粒子 ($>0.4\mu\text{m}$)	无机粒子	石英砂 粘土矿物 $1\mu\text{m}-10\text{mm}$	未定量	未定量	浑浊沿海水 尘埃海水
	有机粒子	病毒 $20-250\text{nm}$	/	蓝光后向散射	
		胶体 $0.4-1\mu\text{m}$	/	后向散射	
		细菌 $0.2-1\mu\text{m}$	蓝光重要吸收体	蓝光重要散射 体, 后向散射	
		浮游植物 $1-200\mu\text{m}$	蓝 _{430nm} 、红 _{665nm} (叶绿素)	主要衍射 前向散射	0.01 mg m^{-3} 清洁 10 mg m^{-3} 沿海 100 mg m^{-3} 富养
		有机碎屑	蓝光吸收明显	后向散射	
		大粒子 $>100\mu\text{m}$	未定量	未定量	



3.2 光的传播特性

■ 光的电磁特性

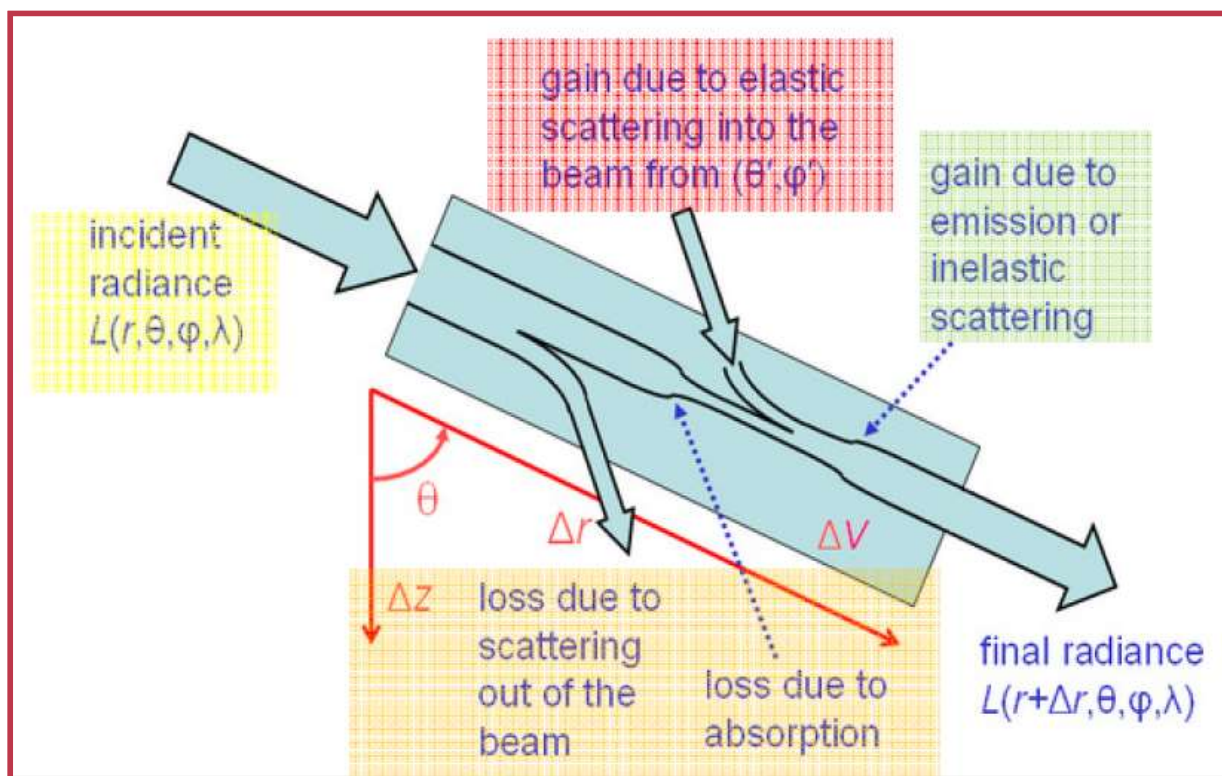
复折射率: $m=n-ik$, 实部散射; 虚部吸收 $\longrightarrow$ Mie散射理论

■ 光的粒子特性 $\longrightarrow$ 辐射传输理论

光子损失



1. 弹性散射到其它方向
2. 非弹性散射到其它波长
3. 真吸收
辐射能变非辐射能



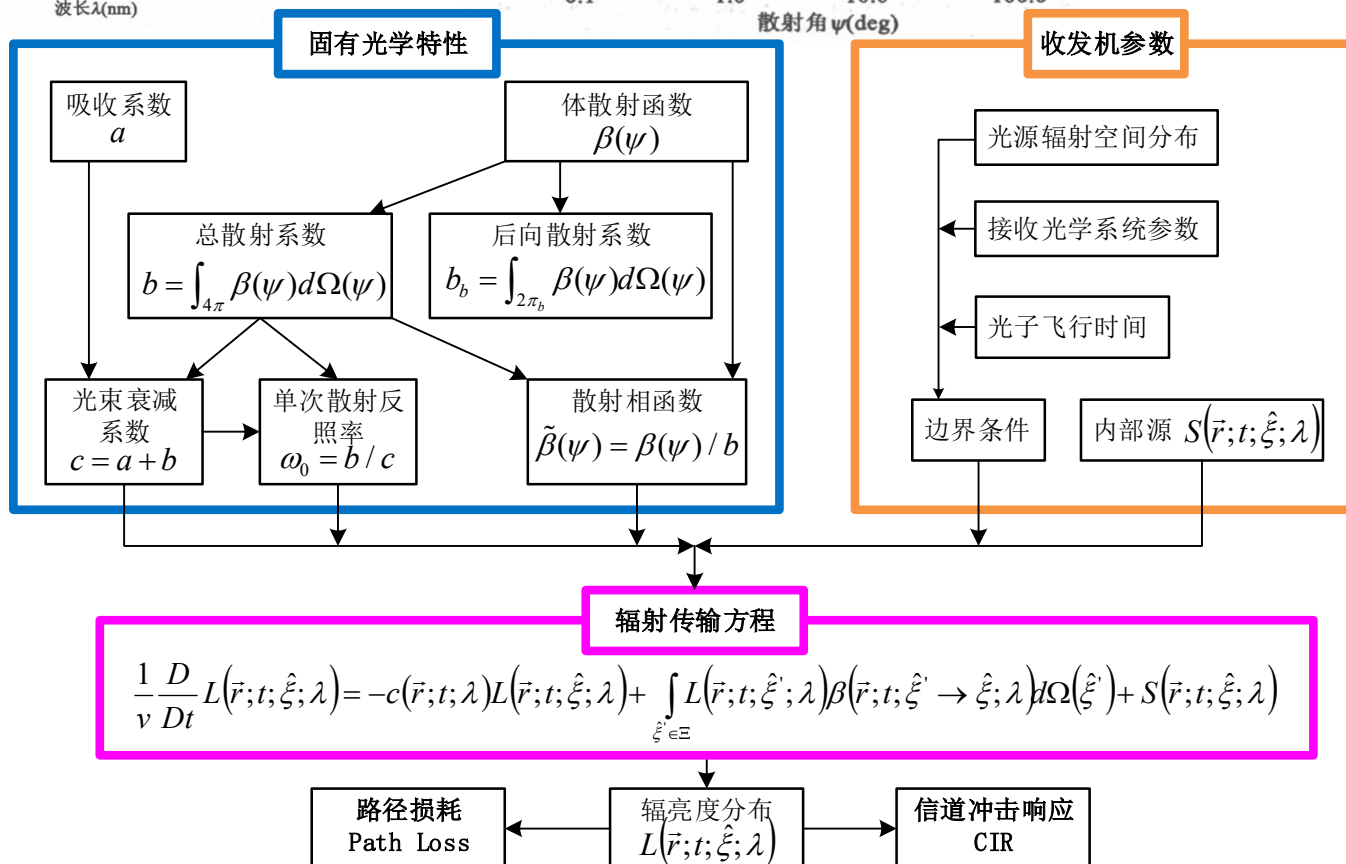
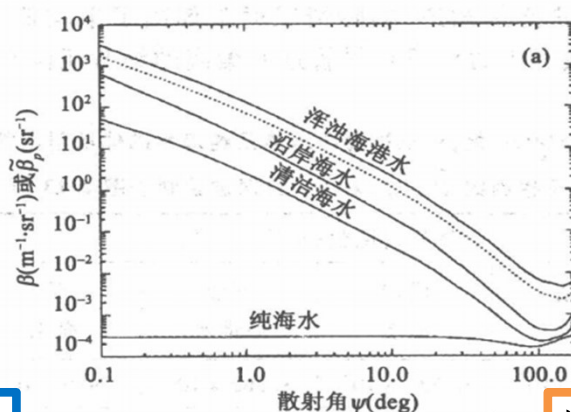
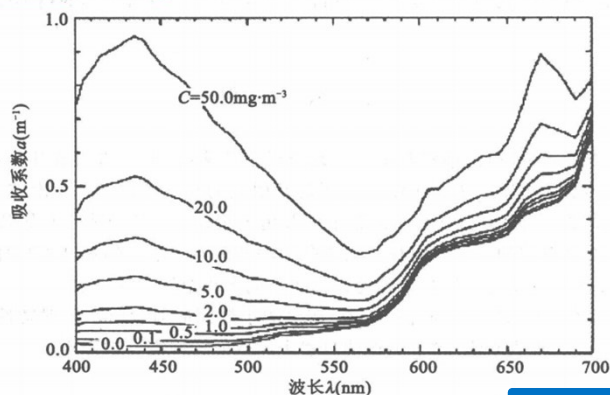
光子增益



1. 来自其它方向的弹性散射
2. 来自其它波长的非弹性散射
3. 真发射
非辐射能变辐射能



3.3 面向通信应用的辐射传输方程





3.4 辐射传输方程求解方法

$$\frac{1}{v} \frac{D}{Dt} L(\vec{r}; t, \hat{\xi}; \lambda) = -c(\vec{r}; t, \lambda) L(\vec{r}; t, \hat{\xi}; \lambda) + \int_{\hat{\xi} \in \mathcal{S}} L(\vec{r}; t, \hat{\xi}'; \lambda) \beta(\vec{r}; t, \hat{\xi}' \rightarrow \hat{\xi}; \lambda) d\Omega(\hat{\xi}') + S(\vec{r}; t, \hat{\xi}; \lambda)$$

求解方法	方法描述	优点	缺点
比尔-朗伯特定律	内光源、体散射为零时的理想条件	算法简单	低估辐射亮度
蒙卡仿真法	随机抽样统计估计	易于编程，灵活度高，三维建模	仿真效率低，随机误差大，特别是深穿透问题
离散纵标法	近似解析求解	结果准确 仿真效率高	编程复杂度高
不变嵌入法	近似解析求解	结果准确 仿真效率高	编程复杂度高，只能求解一维辐射



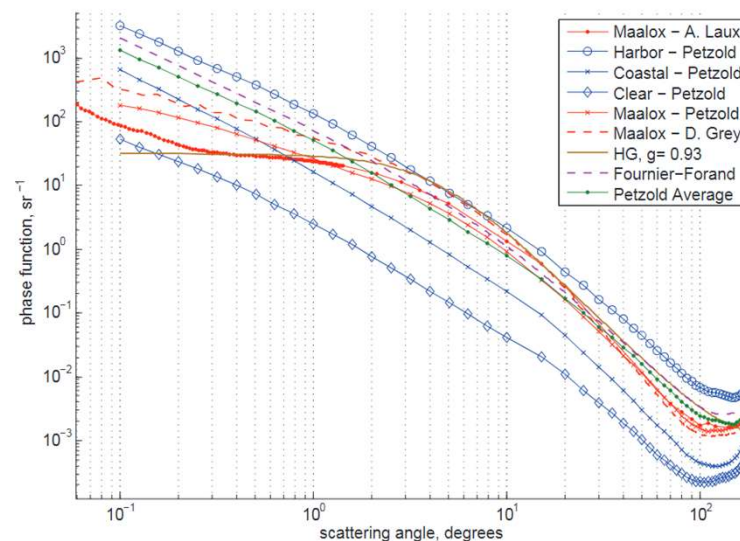
3.5 辐射传输数值模拟的优势与局限

■ 优势

- 可以利用已有的可靠海测数据
- 通信系统参数可以灵活设置
- 与租船海测相比更加经济实际

■ 局限

- 仅适用**低辐照度**或**低光子能量**的电磁辐射。
- 辐射传输理论是一种**现象学理论**，建立在宏观观测基础上，不追究潜在物理依据。代表波动方程的一种**近似**，只有当这种近似合理时方可使用。
- 基于能量的分析，**缺乏完全的相位信息**。
- 用系综平均的辐射亮度不能完全地描述海水的起伏情况，因为**没有考虑大于二阶的统计矩**。

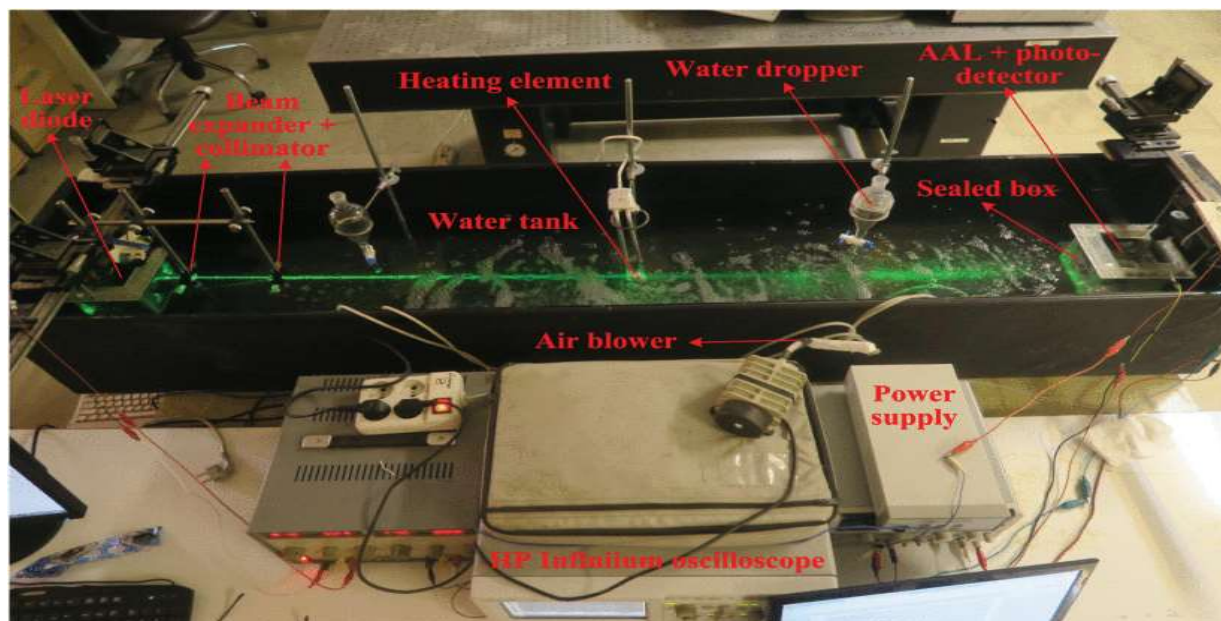




西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

3.6 对海洋湍流及其影响的误解

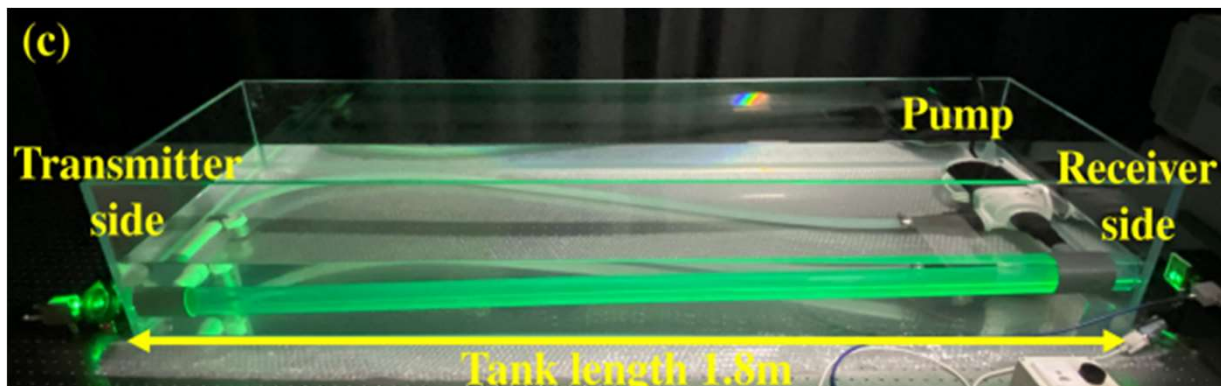
误解一：海洋湍流的成因与模拟



湍流——流体力学（动力学）——世纪难题

海洋湍流——地球流体力学——难题中的难题

海洋湍流模拟需符合地球流体湍流控制方程组

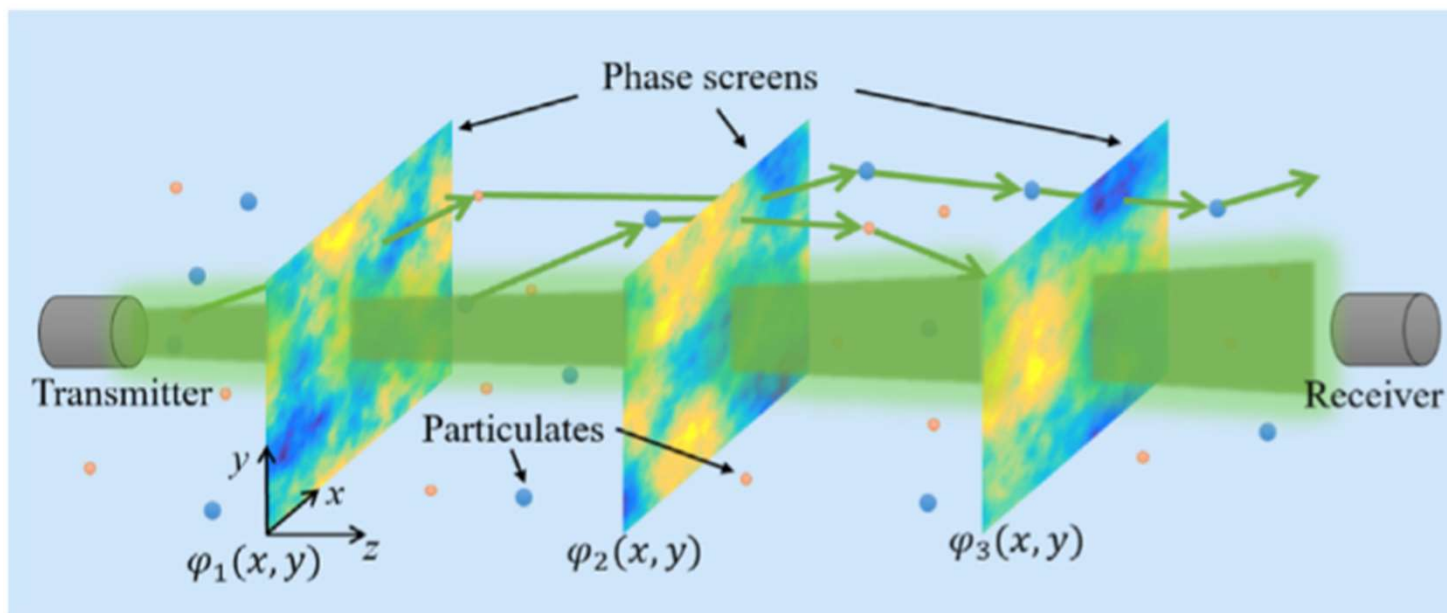


通过加热、注盐制造温盐梯度，或者通过水泵制造水体扰动都无法还原真实海洋湍流条件



3.6 对海洋湍流及其影响的误解

误解二：粒子湍流混合信道建模



海水粒子
折射率随机**离散**分布

辐射传输方程
蒙特卡罗仿真

随机光场统计二阶矩

特例

两种方法研究目标不同
混合建模物理机理不清

海洋湍流
折射率随机**连续**分布

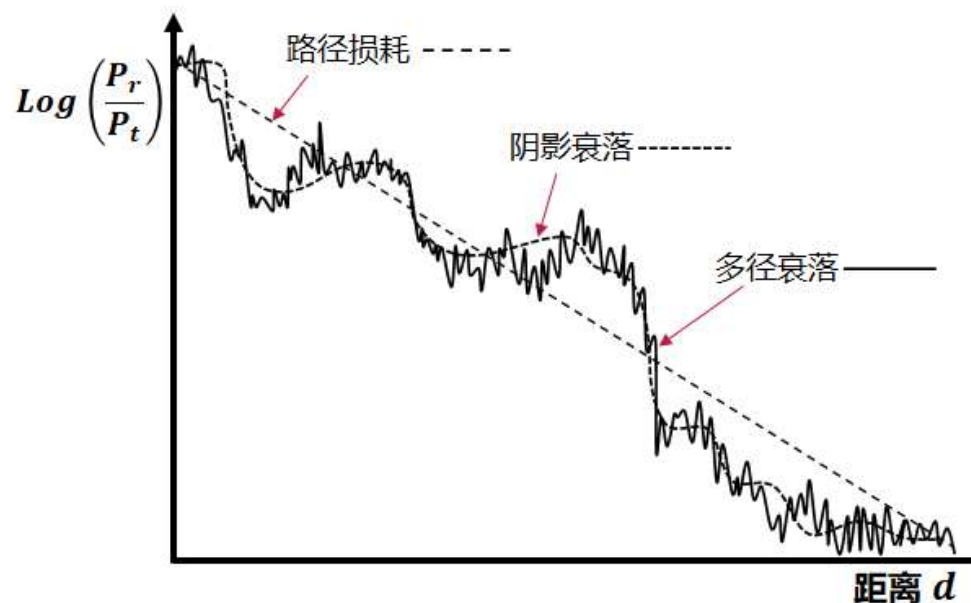
随机波动方程
波动光学仿真

随机光场统计n阶矩

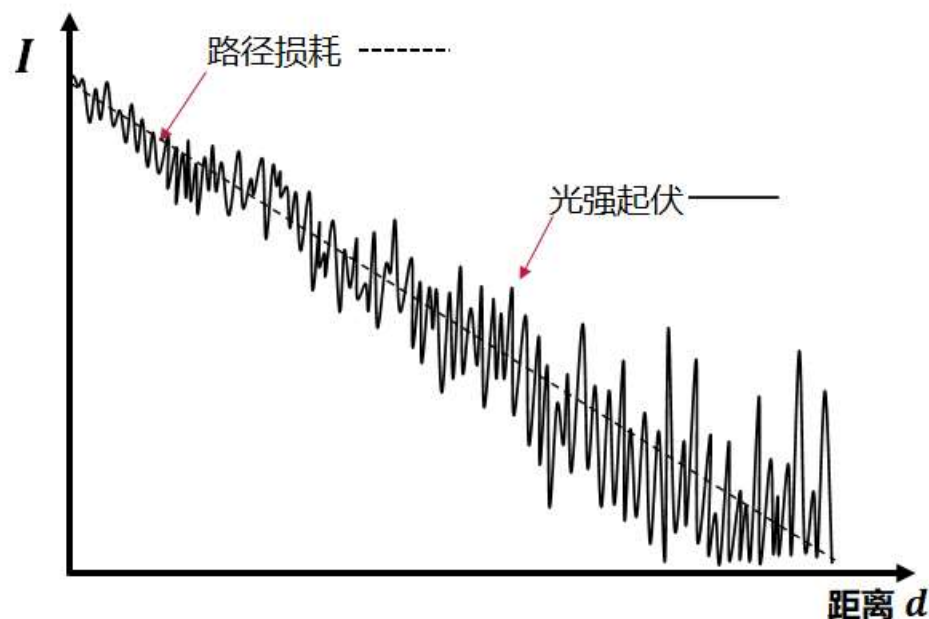


3.6 对海洋湍流及其影响的误解

误解三：湍流引起的光强起伏等同无线通信的多径衰落



无线衰落信道

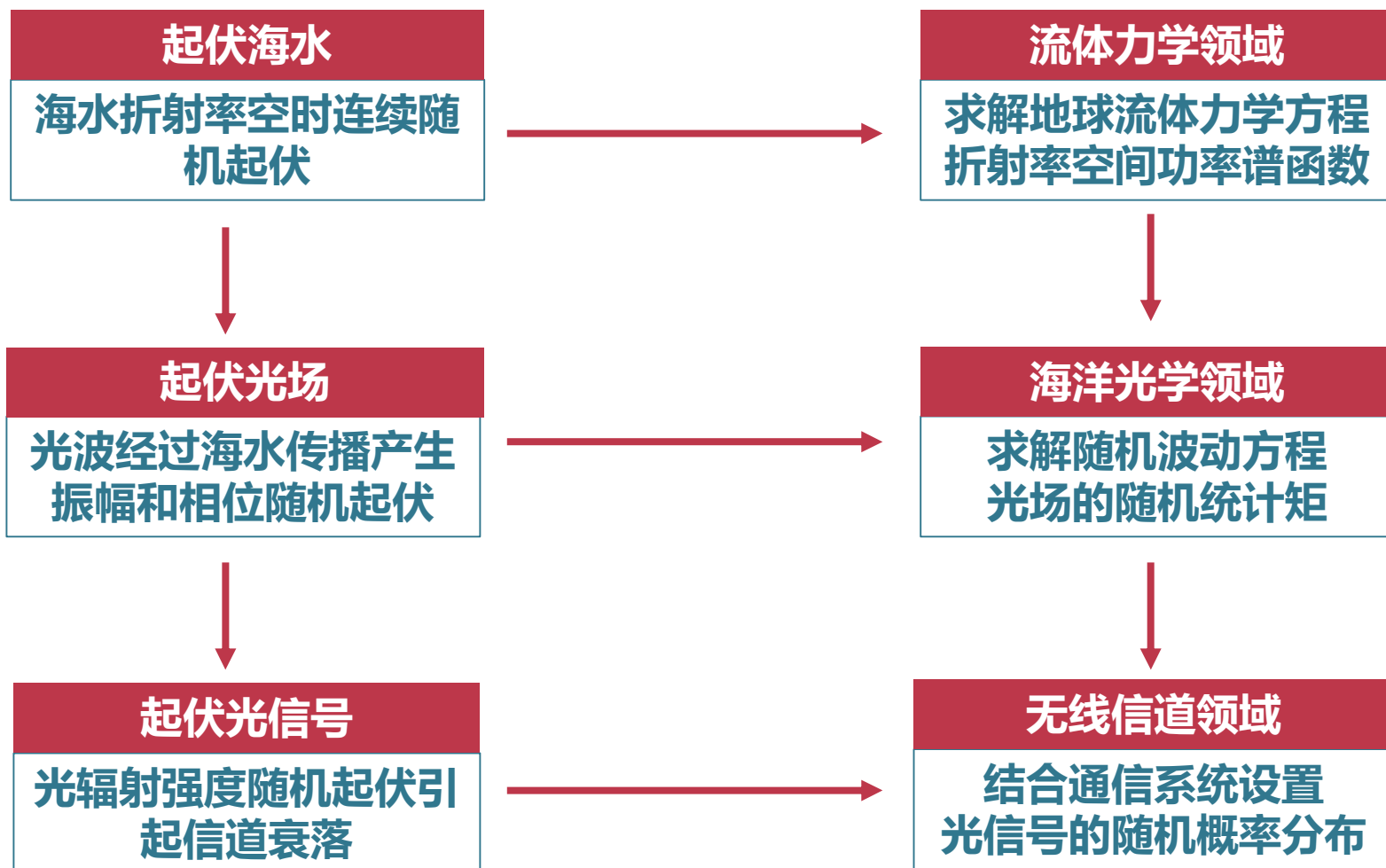


无线光衰落信道

同叫“fading”，但物理意义与数学建模均不同



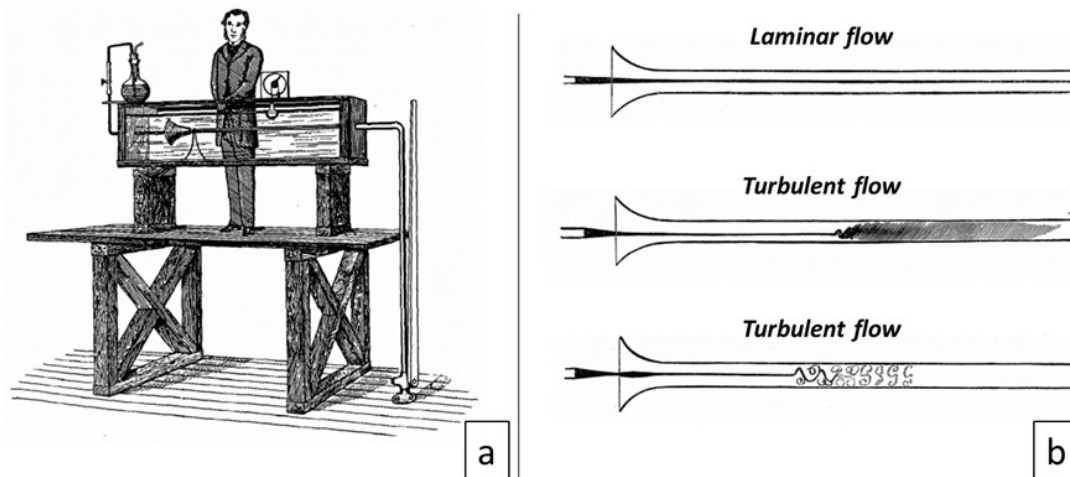
3.7 面向光通信的海洋湍流信道建模思路





3.8 湍流的研究

- 第一阶段：实验发现湍流，Reynolds实验和Reynolds数 Re 的确定；
第二阶段：通过Navier-Stokes方程研究湍流，速度对自身反馈的非线性无法处理；
第三阶段：研究Reynolds方程体现的平均流和脉动流共存和不闭合问题；
第四阶段：研究闭合方法，半经验模式理论和湍流边界层理论；
第五阶段：Taylor的均匀各向同性湍流理论；
第六阶段：以Karman-Howarth方程开始的湍流动力学研究；
第七阶段：以Kolmogorov为代表的局地均匀各向同性湍流理论的提出，能谱方法的研究。包括速度相关函数和量纲分析， $(-5/3)$ 幂率，普适性问题；
第八阶段：拟序结构和间隙性的实验发现；
第九阶段：基于计算机硬件快速发展的各类数值模拟的进展，特别是对N-S方程的直接模拟。



湍流是指由N-S方程所描述的粘性流体，当超过临界 Re 后，从规则流动转换为在时空中紊乱复杂的多尺度涡旋运动的形态



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

3.9 海洋湍流

海洋湍流方程组

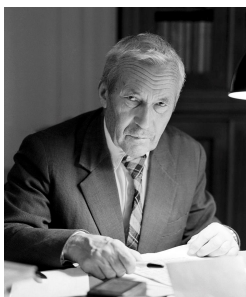
$$\partial p_0 u_i / \partial t = -\partial / \partial x_\alpha (\rho_0 u_i u_\alpha + p \delta_{i\alpha} - \sigma_{i\alpha}) + g \rho \delta_{i3} + 2 \rho_0 e_{i\alpha\beta} \omega_\beta u_\alpha$$

$$\partial u_\alpha / \partial x_\alpha = 0.$$

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \simeq -\alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0)$$

$$\frac{\partial(c_p \rho_0 T)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(c_p \rho_0 T u_\alpha - c_p \rho_0 \chi \frac{\partial T}{\partial x_\alpha} \right) + c_p \rho_0 (g \rho_0 \Gamma w)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 S)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\rho_0 S u_\alpha - \rho_0 D \frac{\partial S}{\partial x_\alpha} \right)$$



Kolmogorov
湍流统计学派大师

学生

A.N. Obukhov
研究大气湍流
时任莫斯科大气物理研究所所长

学生

A.S. Monin
研究海洋流体力学
时任莫斯科海洋研究所所长

A. S. MONIN AND R. V. OZMIDOV

*P. P. Shirshov Institute of Oceanology,
Academy of Sciences, Moscow, U.S.S.R.*

Turbulence in the Ocean

Translation edited by H. Tennekes

Royal Netherlands Meteorological Institute, de Bilt
and Free University, Amsterdam

D. Reidel Publishing Company

A MEMBER OF THE KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS GROUP

Dordrecht / Boston / Lancaster





Karman-Howarth方程

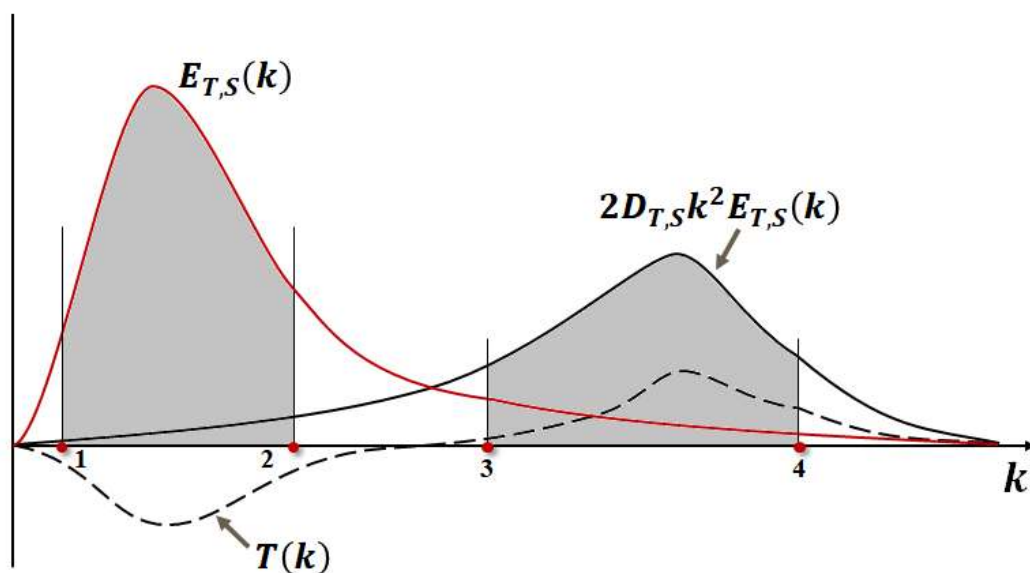
——相关函数是能量的度量，反映湍流场演化中能量的动态平衡

$$\frac{\partial}{\partial t} R_{LL}(r, t) = \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{4}{r} \right) R_{LL,L}(r, t) + 2D \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) R_{LL}(r, t)$$

Karman-Howarth湍能谱方程

——能谱是相关函数的Fourier变换

$$\frac{\partial E(k, t)}{\partial t} = T(k, t) - 2Dk^2 E(k, t)$$



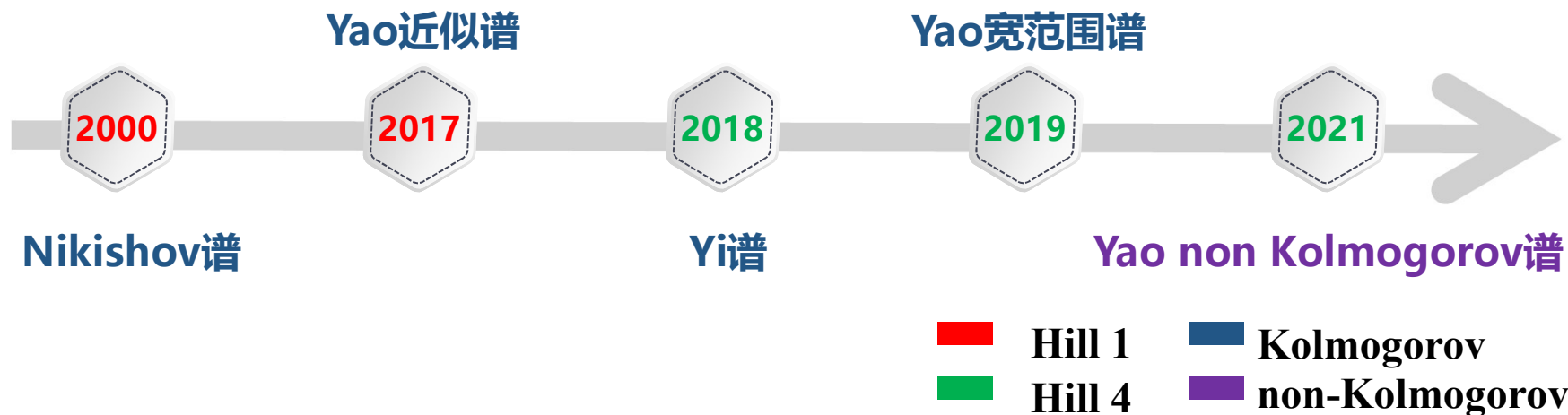


3.10 海水折射率起伏建模

单标量谱

作者	年份	温度谱	盐度谱	文献
Grant	1968	√		[1]
Hill	1978	√	√	[2]

综合谱模型



[1]. H. L. Grant, B. A. Hughes, W. M. Vogel, and A. Moilliet, "The spectrum of temperature fluctuations in turbulent flow," J. Fluid Mech. 34, 423-492 (1968).

[2]. R. J. Hill, "Optical propagation in turbulent water," J. Opt. Soc. Am. 68(8), 1067-1072 (1978).



3.10 海水折射率起伏建模

01

单标量谱 【温度、盐度】

Hill 1	□ 唯一具有封闭解的模型
Hill 4	□ 最接近实验和仿真结果的模型
Kolmogorov	□ 折射率功率谱在低波数区正比于 $\kappa^{-11/3}$
non-Kolmogorov	□ 折射率功率谱在低波数区正比于 $\kappa^{-\alpha}$, $\alpha \in [11/3, 5]$

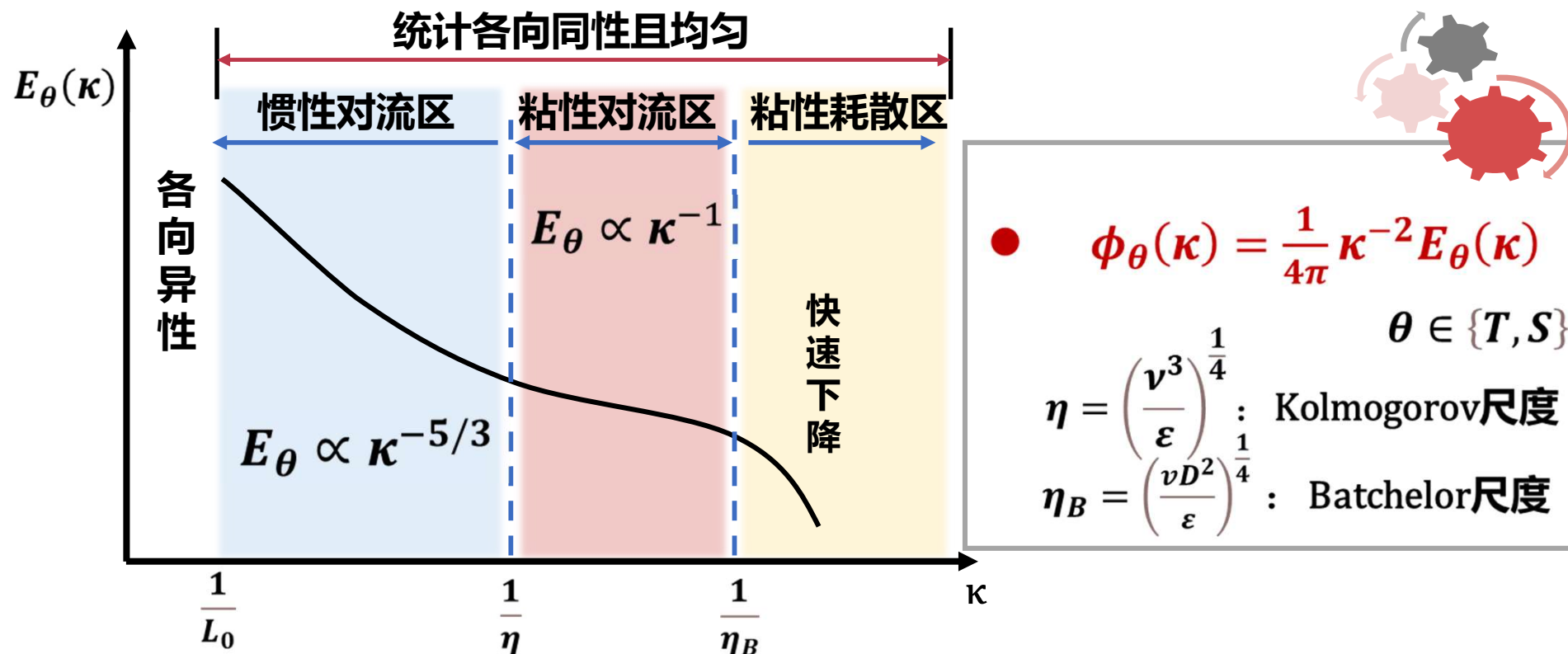
02

温盐耦合谱

□ 由于温度-盐度耦合谱与温度功率谱、盐度功率谱具有相同的稳态谱方程，故可采用“ Nikishov类比方法 ”得到
□ 对于海洋 非经典湍流 ，标量功率谱不再遵循稳态谱方程，且实验证明：温度功率谱和盐度功率谱不具有恒等的幂律；故引入“ 谱相关度 ”获得温度-盐度耦合谱



3.10 海水折射率起伏建模



作者	研究区域	总结
☐ Kolmogorov	惯性对流区	Hill提出了任意普朗特数标量谱的 四种模型 ，实现了3个区域的平滑过渡
☐ Batchelor	粘性对流区	
☐ Kraichnan	粘性扩散区	



3.10 海水折射率起伏建模

2000 Nikishov

- 首次提出 “Nikishov类比法” → 温盐耦合谱
- 首次提出 “线性组合” → 折射率功率谱

$$\phi_n(\kappa) = A^2 \phi_T(\kappa) + B^2 \phi_S(\kappa) - 2AB \phi_{TS}(\kappa)$$

2017 Yao

Nikishov中多项式复杂:

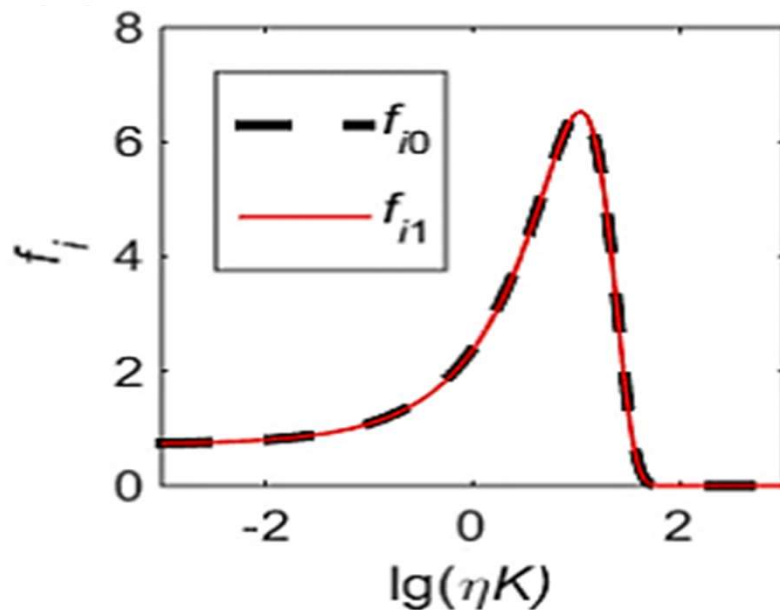
$$1.5 Q^2 (\kappa \eta)^{\frac{4}{3}} + Q^3 (\kappa \eta)^2$$



Yao提出海洋湍流近似谱, 简化计算

归一化谱:

$$f_T(\kappa \eta) = 4 \pi \varepsilon^{\frac{1}{3}} \chi_T^{-1} \kappa^{\frac{11}{3}} \phi_T$$



结果表明: PrS=700时, Nikishov谱与近似谱拟合良好

- [1]. V. V. Nikishov and V. I. Nikishov, Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index, Int. J. Fluid Mech. Res. 27(1), 82-98 (2000).
- [2]. J. Yao, Y. Zhang, R. Wang, Y. Wang, and X. Wang, Practical approximation of the oceanic refractive index spectrum, Opt. Express 25(19), 23283-23292 (2017).



3.10 海水折射率起伏建模

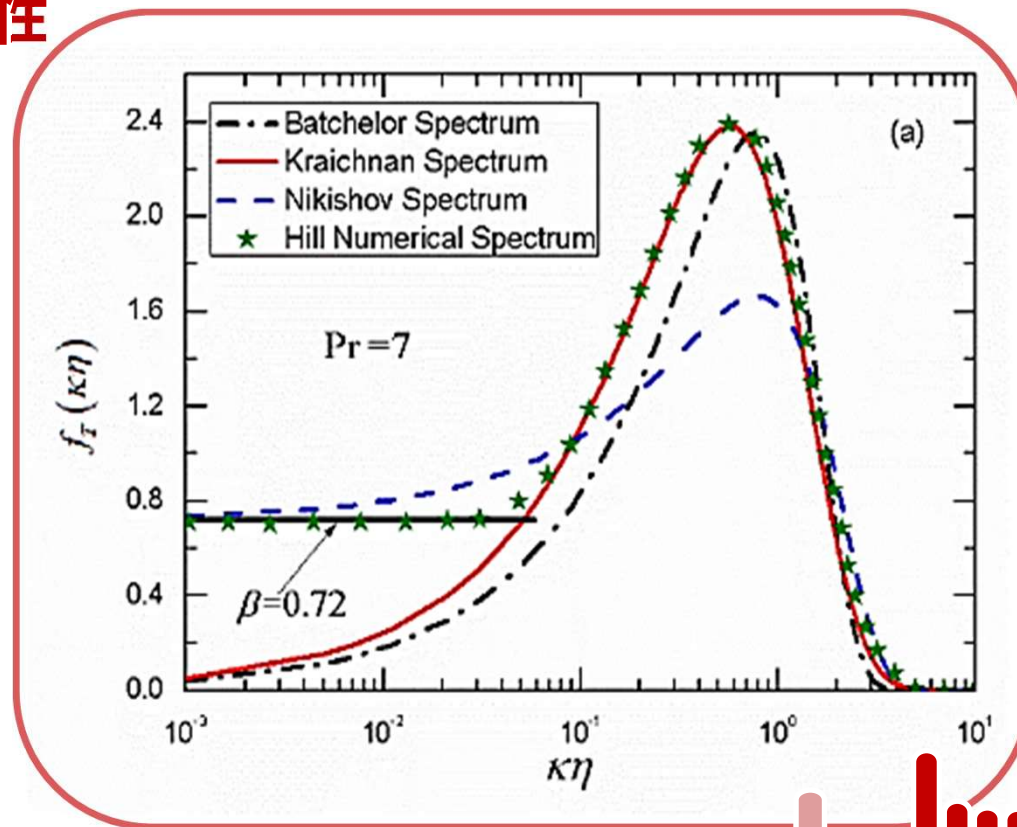
如图所示：Hill 1 存在以下**局限性**



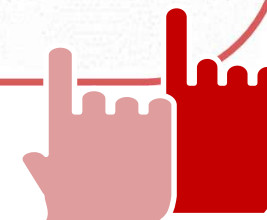
Nikishov功率谱所依据的Hill 1模型显著低估了粘性范围内的“bump”，精度低



Hill 1大波数时趋于Batchelor谱，而直接数值模拟（DNS）结果和实验结果均趋于Kraichnan谱，不相一致



□相应地，基于Hill 4模型的一系列功率谱被提出



X. Yi and I. B. Djordjevic, Power spectrum of refractive-index fluctuations in turbulent ocean and its effect on optical scintillation, Opt. Express 26(8), 10188-10202 (2018).



2018 Yi

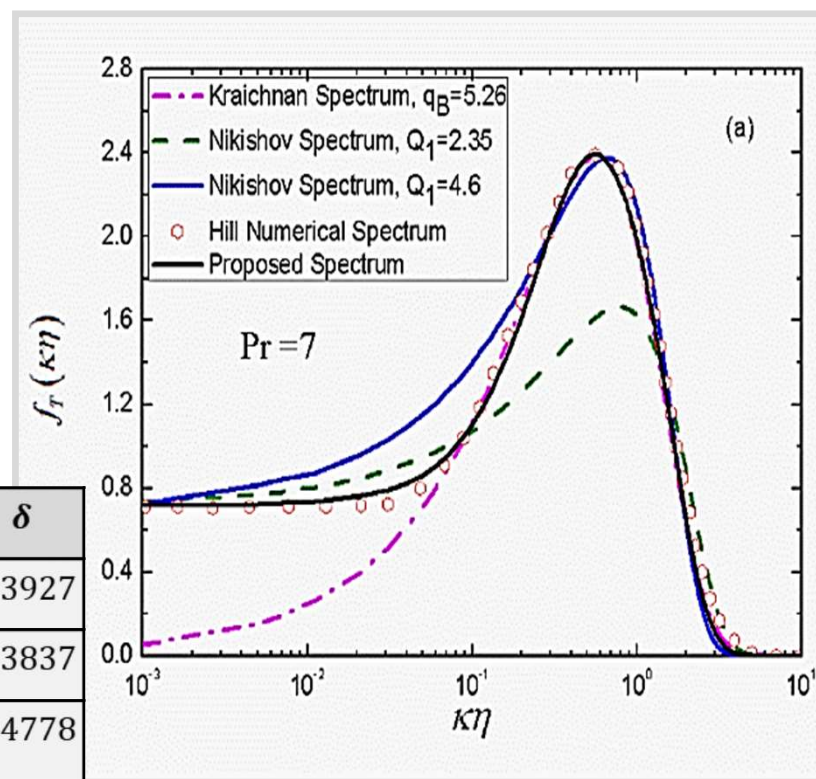
首次基于Hill 4模型得到了新的海洋折射率功率谱

数值拟合:

$$g(x, Pr) = \left[1 + \sum_{n=1}^N a_n x^n \right] \exp(-\delta x)$$

拟合结果(N=5):

特定 Pr 数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	δ
$Pr_T = 7$	5.1615	67.1941	-45.918	53.3589	1.2064	3.3927
$Pr_S = 700$	7.6156	1.4268	0.2239	-0.0105	0.0026	0.3837
$Pr_{TS} = 13.86$	6.968	40.4984	-21.7085	21.4159	0.0503	2.4778



结果表明: Yi 谱与Hill 4数值谱拟合良好; 高波数区与Kraichnan谱一致

X. Yi and I. B. Djordjevic, Power spectrum of refractive-index fluctuations in turbulent ocean and its effect on optical scintillation, Opt. Express 26(8), 10188-10202 (2018).



3.10 海水折射率起伏建模

□ 数值求解: $g(\kappa\eta)$

$$\frac{d}{dz} \left\{ (z^{2b} + 1)^{-\frac{1}{3b}} \left[-\frac{11}{3} f(z) + z \frac{df(z)}{dz} \right] \right\} = \frac{22}{3} cz^{\frac{1}{3}} f(z)$$

其中: $f(z) = g(az) = g(\kappa\eta)$ $c_\theta = \frac{\beta a^{4/3}}{Pr_\theta}$

$Pr \in [3, 3000]$	$Pr_\theta = 7$	$Pr_\theta = 300$	$Pr_\theta = 3000$	结论
求解结果				中、高波数区与 Kraichnan (b) 模型重合

J. R. Yao, H. J. Zhang, R. N. Wang, J. D. Cai, Y. Zhang, and O. Korotkova, Wide-range prandtl/schmidt number power spectrum of optical turbulence and its application to oceanic light propagation, Opt. Express 27(20), 27807-27819 (2019).



□ 数值拟合

$$g(\kappa\eta) = [1 + 21.61(\kappa\eta)^{0.61}c^{0.02} - 18.18(\kappa\eta)^{0.55}c^{0.04}] \times \exp[-174.90(\kappa\eta)^2c^{0.96}]$$

Pr_ϵ [3, 3000]	$Pr_\theta = 3$	$Pr_\theta = 300$	$Pr_\theta = 3000$	结论
拟合结果				□ 与Hill 4 吻合; □ 粘性区与Kraichnan模型吻合

J. R. Yao, H. J. Zhang, R. N. Wang, J. D. Cai, Y. Zhang, and O. Korotkova, Wide-range prandtl/schmidt number power spectrum of optical turbulence and its application to oceanic light propagation, Opt. Express 27(20), 27807-27819 (2019).



大气中non-Kolmogorov折射率功率谱



湍流类型	光谱样式	谱	内尺度	外尺度	文献
Non-Kolmogorov 湍流 (幂律值范围为3 ~ 5) □描述分层、湍流未 充分发展等非经典湍 流	最简单的光谱	■ Non-Kolmogorov谱	×	×	
	解析谱	■ 广义von Karman谱	√	√	[1]
		■ 广义指数谱	√	√	[2]
	物理谱	■ 广义修正大气谱	√	√	[3]

[1]. Toselli I, Andrews L C, Phillips R L, Ferrero V. Atmospheric Propagation IV, 2007: 65510E.

[2]. Cui L Y , Xue B D , Cao X G , et al. Optics Express, 2010, 18(20):21269-83.

[3]. Xue B D, Cui L Y, Xue W F, Bai X Z, Zhou F G. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(5): 912-916.



3.10 海水折射率起伏建模

实验数据表明

海洋中也存在non-Kolmogorov现象

作者	实验年份	实验结果	文献
T. E. Pochapsky	1967	■ 海洋温度梯度能谱呈现取值为 2 的幂律，相应拟能谱幂律也约为 2 ，即温度功率谱幂律达到 4	[1]
T. Ichiye	1968	■ 海洋温度起伏拟能谱和盐度起伏拟能谱呈现非 Kolmogorov 幂律，幂律取值位于 5 / 3 到 3 之间，即相应功率谱幂律取值位于 11 / 3 到 5 之间 ■ 温度功率谱幂律大于盐度功率谱幂律	[2]

[1]. Pochapsky T E, Malone F D. Spectra of Deep Vertical Temperature Profiles[J]. Journal of Physical Oceanography, 1972, 2(4): 470-475.

[2]. Ichiye T. Power Spectra of Temperature and Salinity Fluctuations in the Slope Water Off Cape Hatteras[J]. Pure and Applied Geophysics, 1972, 96(1): 205-216.



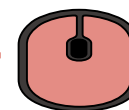
3.10 海水折射率起伏建模



首次提出基于non-Kolmogorov理论的海洋湍流谱

温盐标量谱

$$\phi_i(\kappa, \alpha_i) = A(\alpha_i) C_i^2 \kappa^{-\alpha_i} g_i(\kappa \eta'), \quad \text{其中 } \eta' = \frac{\eta}{h(\alpha_i, c_i)}$$



温盐耦合谱

non-Kolmogorov: 由于温度谱和盐度谱的幂律不同, 无法 “Nikishov类比”



上限限制

$$0 \leq \phi_{TS}(\kappa, \alpha_T, \alpha_S) \leq [\phi_T(\kappa, \alpha_T) \phi_S(\kappa, \alpha_S)]^{1/2}$$

谱相关性

$$\phi_{TS}(\kappa, \alpha_T, \alpha_S) = \gamma_{ST} [\phi_T(\kappa, \alpha_T) \phi_S(\kappa, \alpha_S)]^{1/2}$$



3.10 海水折射率起伏建模

海洋湍流 折射率功率谱	单一标量谱				温盐耦合谱	
	Hill 1	Hill 4	Kolmogorov	Non-Kolmogorov	幂律相等	幂律不等
2000 Nikishov谱	√		√		√	
2017 Yao近似谱	√		√		√	
2018 Yi谱		√	√		√	
2019 Yao宽范围谱		√	√		√	
2021 Yao non-Kolmogorov谱		√		√		√



3.11 随机波动方程及求解

随机波动方程

标量Helmholtz方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 n^2(\mathbf{R}) \mathbf{E} + 2 \nabla[\mathbf{E} \cdot \nabla \log n(\mathbf{R})] = 0$$

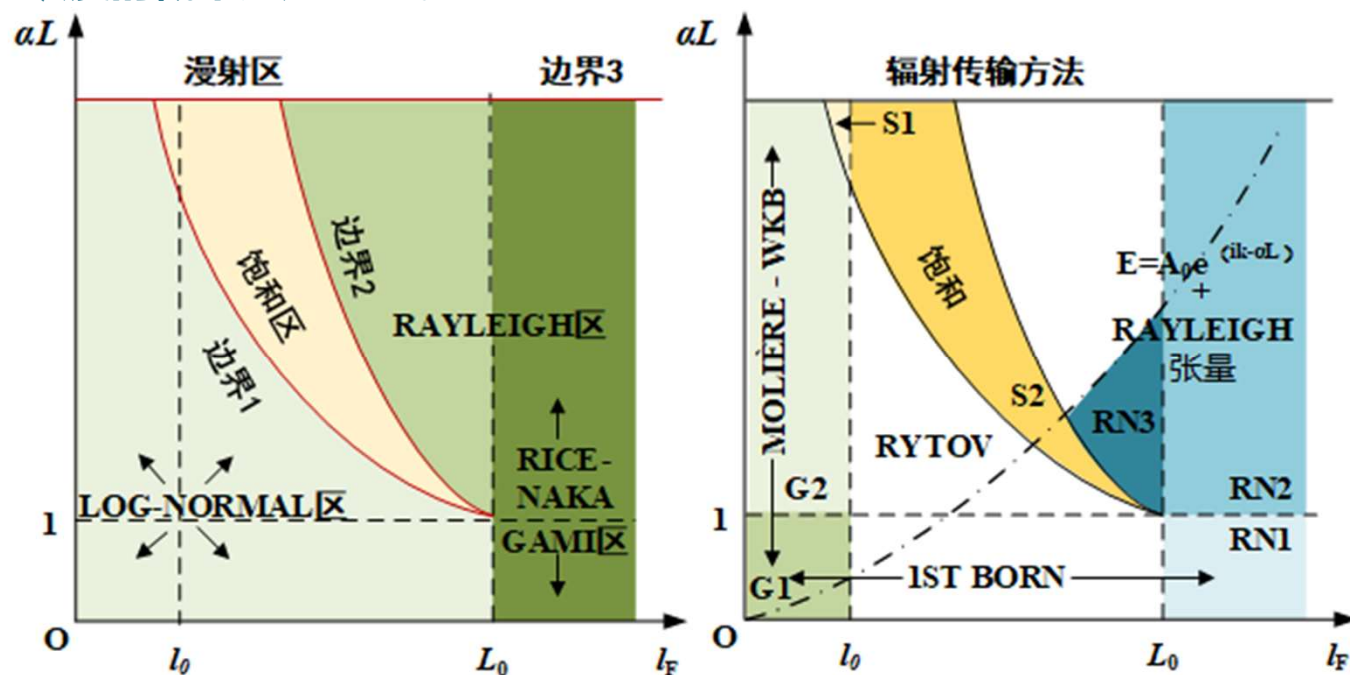
$$\nabla^2 U + k^2 n^2(\mathbf{R}) U = 0$$

湍流散射的平均自由长度 αL $\alpha = \text{const.} \times k^2 \times \int_0^\infty d\kappa \kappa \Phi_n(\kappa)$

边界1: 令 $\langle \theta_r^2 \rangle = \theta_F^2$, 即折射角等于菲涅尔角

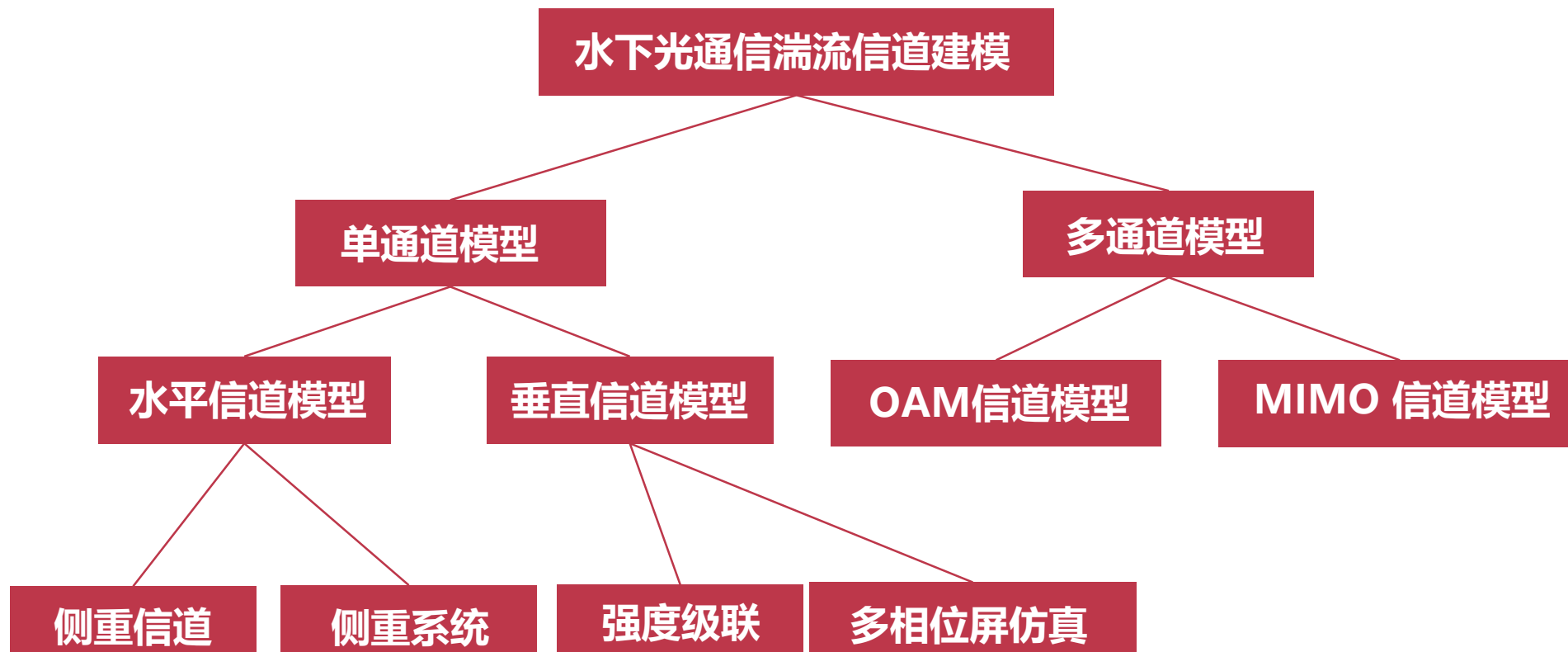
边界2: 令 $L^2 \langle \theta_r^2 \rangle \approx L_0^2$, 即由折射引起的横向偏移不应超过外尺度

边界3: 令 $\langle \theta_r^2 \rangle_{\text{ray}} \approx \pi/2$, $\langle \theta_r^2 \rangle_{\text{ray}}$ 为折射角的几何光学近似, 与波长无关, 这个边界条件表示光线折射 $\pi/2$ 弧度的概率超过50%。





3.12 水下光通信湍流信道建模

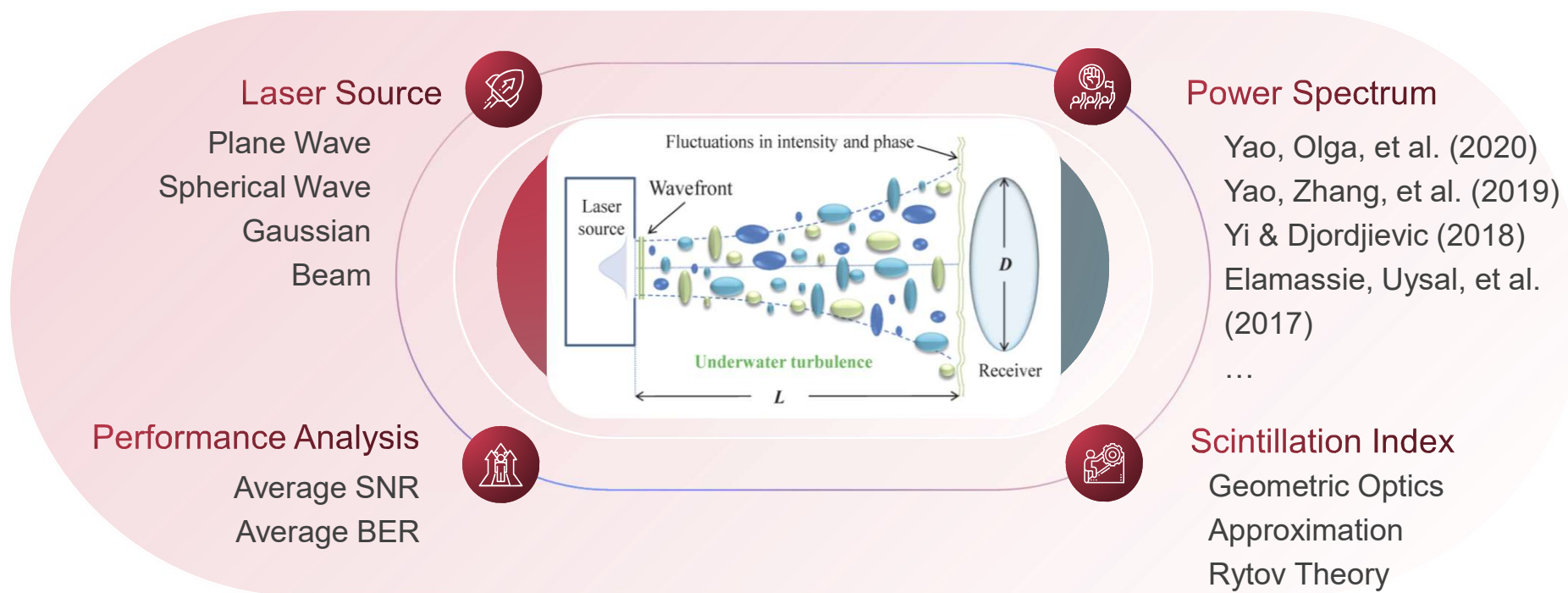




西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

3.13 单通道水平信道

侧重信道物理特性的建模





3.13 单通道水平信道

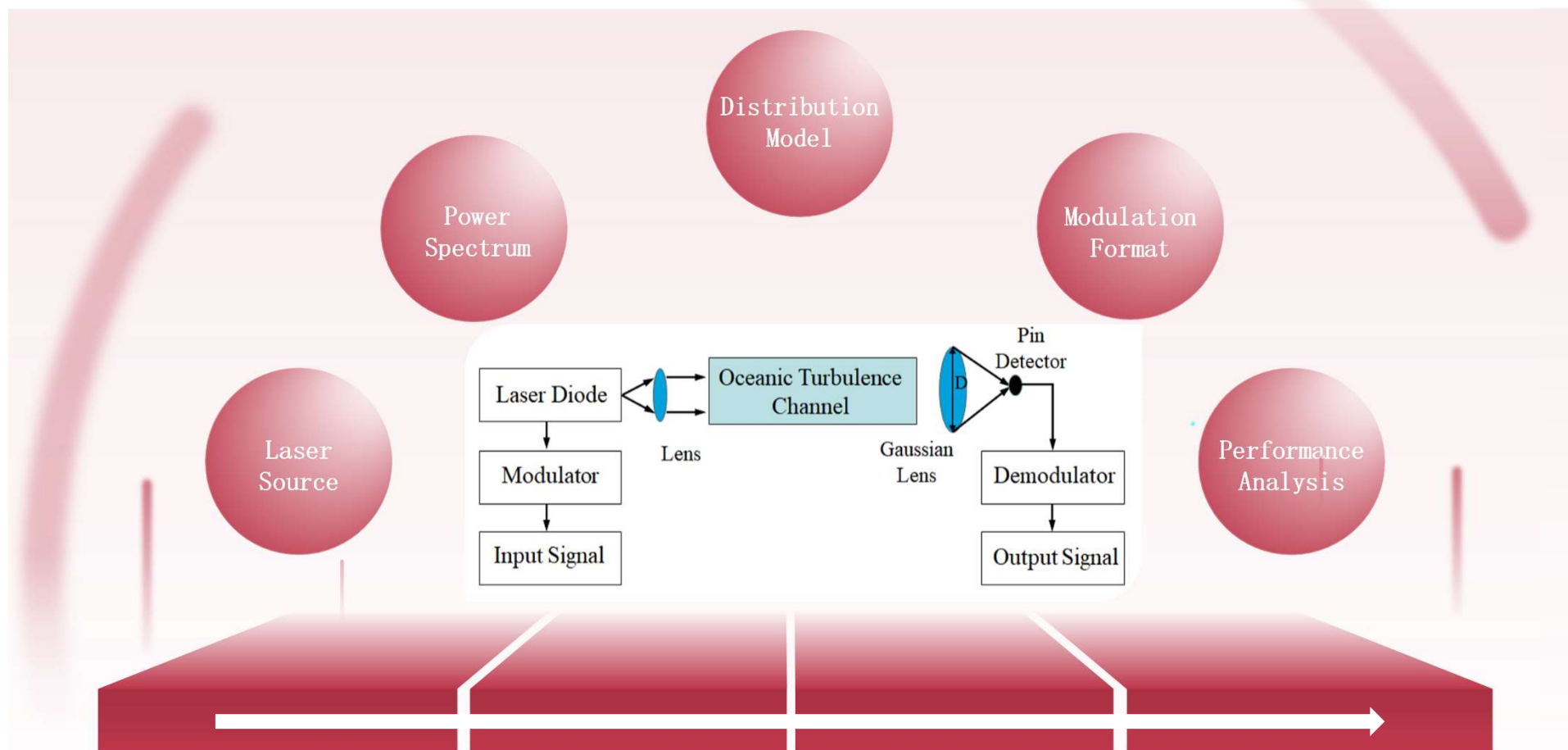
侧重信道物理特性的建模

Power Spectrum	Journal	Characteristics	Laser Source	Approach	SI	<BER>
Nikishov (2000)	J. Fluid Mech	Linear combination of temperature, salinity, and temperature-salinity coupling firstly	Plane wave	Rytov	√	√
			Spherical wave		aperture-averaged	√
			Gaussian beam			
Yao, Zhang (2017)	OE	Easy to find the analytical solution	Plane wave Spherical wave	Extended Rytov	√	√
Elamassie, Uysal (2017)	JOSAA	Unstable ocean turbulence stratification	Plane wave Spherical wave	Rytov	aperture-averaged	√
Yi (2018)	OE	Fit well with DNS data and Kraichnan model	Plane wave Spherical wave	Rytov	√	
Yao, Zhang (2019)	OE	Applicable to any Pr/Sc number	Spherical wave	Rytov	√	
Yao, Olga (2020)	JOSAA	Relate Pr, Sc, and dr to <T> and <S>	Plane wave Gaussian beam	Rytov	√ AO corrections	√ √



3.13 单通道水平信道

侧重端到端系统性能的信道建模





3.13 单通道水平信道

侧重端到端系统性能的信道建模

Power Spectrum	Journal	Distribution Model	Laser Source	Modulation format	Performance Analysis
Elamassie [Anisotropic]	2020 JOSA	Málaga	Spherical wave	IM/DD	Outage Probability Average Channel Capacity
Elamassie [Anisotropic]	2020 OE	Málaga	Plane wave	IM/DD	Average Channel Capacity
Elamassie [Anisotropic]	2020 AO	IK	Plane wave Spherical wave	OOK	Outage Probability BER
Nikishov	2020 OC	GG	Gaussian beam	Rectangle-QAM	Average BER
Nikishov	2021 IJCS	EGG		IM/DD	Outage Probability Average BER
Nikishov	2021 WCL	FSO: GG UWOC: EGG		IM/DD	Outage Probability Average BER Average Channel Capacity



水平信道建模的局限

局限 1

理想化

- The channel model is ideal.

The transceiver platform may not remain horizontal due to the influence of water flow, etc



Limitations

局限 2

特定场景

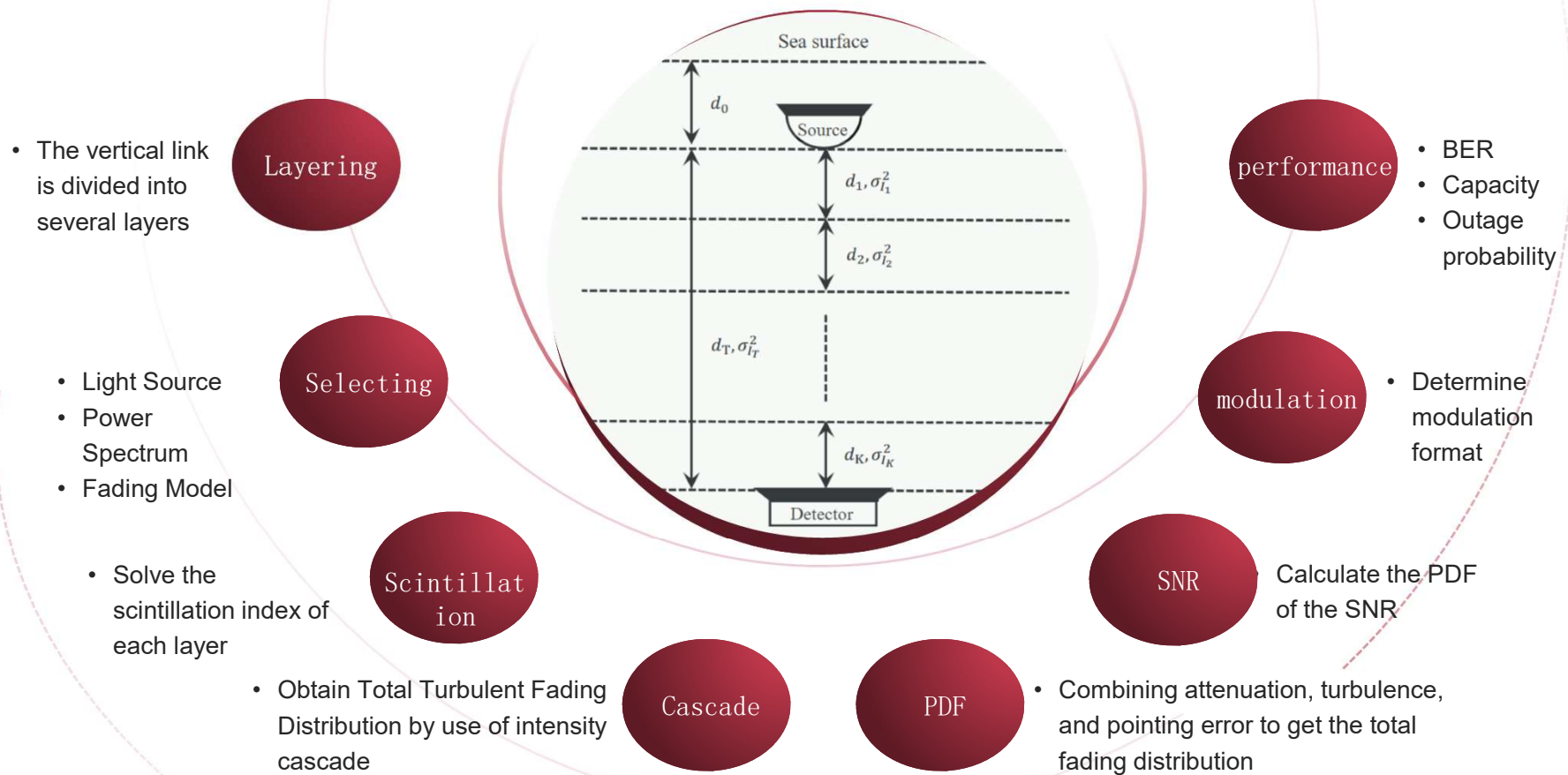
- Analysis was performed only for specific depths, and the variation of temperature salinity with depth was not considered.

- Not applicable to scenarios such as underwater uplink or downlink data transmission.



3.14 单通道垂直信道 (1)

强度级联的建模思路





3.14 单通道垂直信道 (1)

强度级联的建模思路

Journal	Author	Laser Source	Distribution Model	Modulation format	Performance Analysis
2022 JOCN	Mohammad Ali Khalighi	Gaussian beam	Log-Normal	OOK	Outage Probability
2022 Arxiv	Ziyaur Rahman	Gaussian beam	GG, EGG, EW, $\Gamma\Gamma$	OOK	Outage Probability <BER>
2020 TWC	Mohammed Elamassie	Plane wave	Log-Normal $\Gamma\Gamma$	PAM	<BER> Ergodic Capacity
2018 IEEE [C]	Mohammed Elamassie	Plane wave	$\Gamma\Gamma$	PAM	<BER>
2018 IEEE [C]	Mohammed Elamassie	Plane wave Spherical wave	Log-Normal	PAM	<BER>

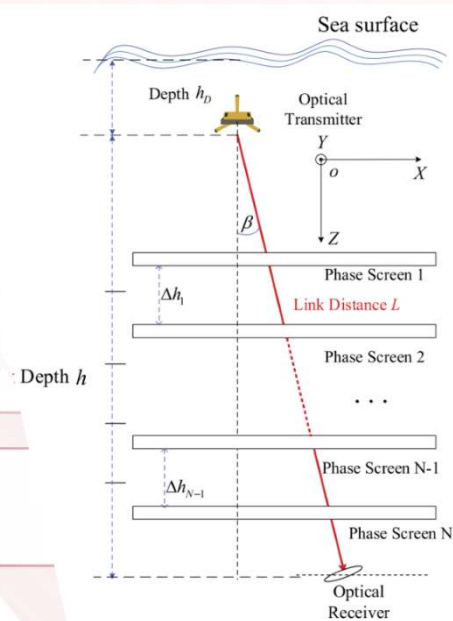


多层相位屏的建模思路

Laser Source

Power Spectrum

PDF Model



Phase screen Set

Scintillation Index

Performance

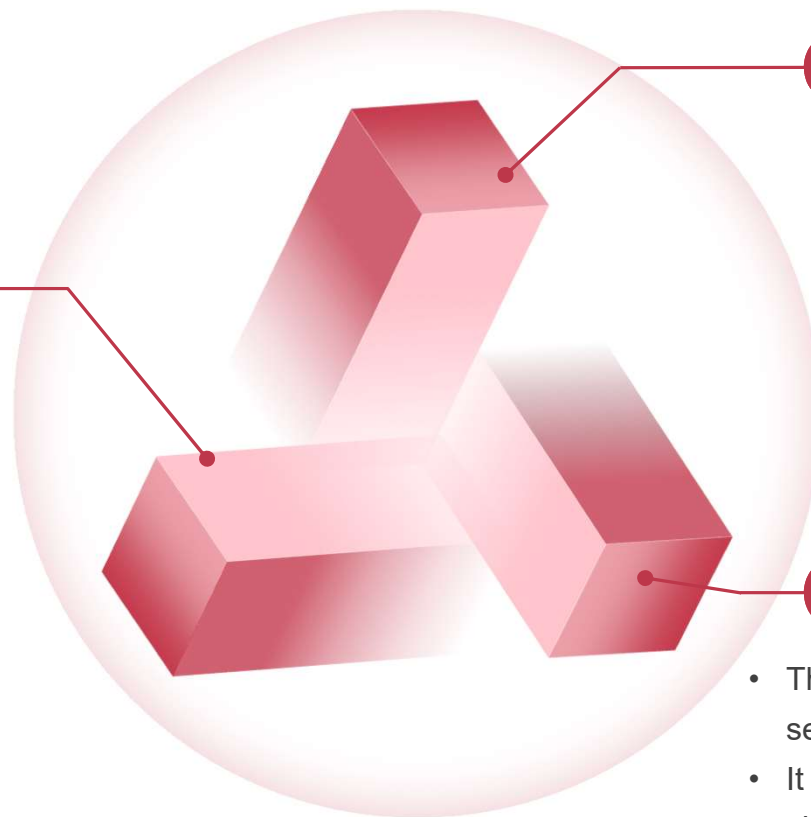
X. Y. Ji, H. X. Yin, L. Y. Jing, Y. J. Liang, and J. Y. Wang, Modeling and performance analysis of oblique underwater optical communication links considering turbulence effects based on seawater depth, *Opt. Express* 30(11), 18874-18888 (2022).



3.16 垂直信道建模存在的问题

Unreasonable Depth Layering

- The variation of temperature salinity with depth is not uniform.
- Thus, equal depth layering is unreasonable.



Unreasonable Intensity Cascade

- End-to-end analysis of wireless optical channels is different from multi-hop analysis of wireless channels.
- Thus, intensity cascade is unreasonable.

Unreasonable Statistical Methods

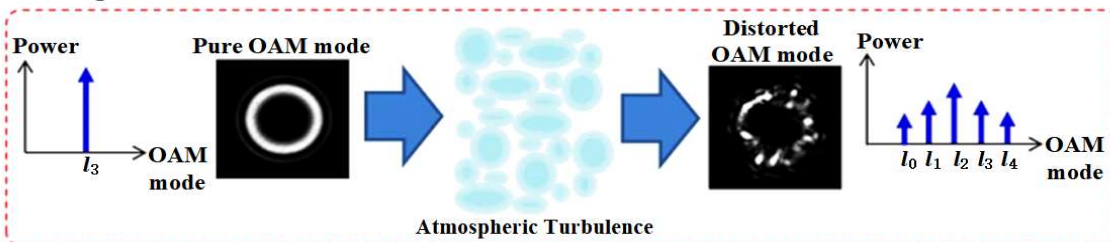
- The PDF of light intensity should not be selected at the beginning.
- It should be determined through multiple simulation realizations



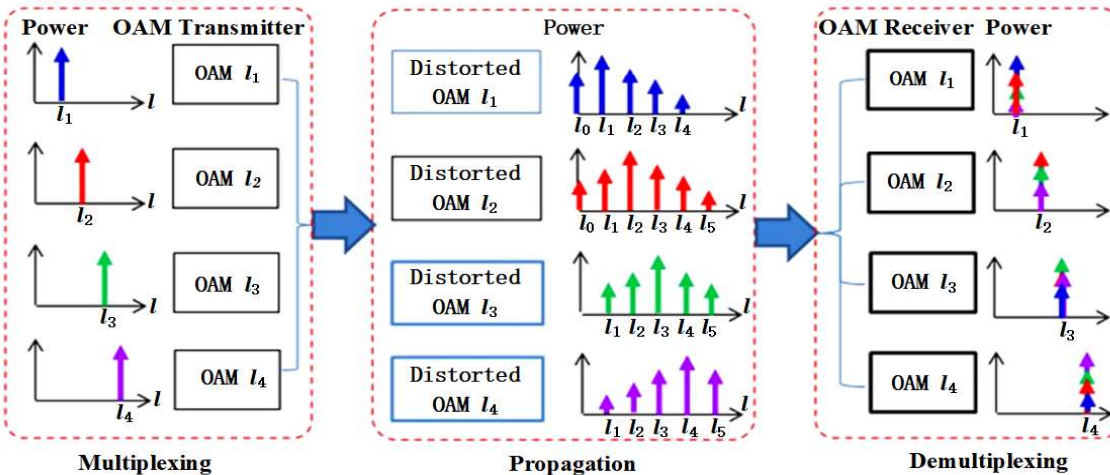
3.17 多通道信道建模—OAM

OAM 模式复用

(a) Single beam



(b) Multi-beam



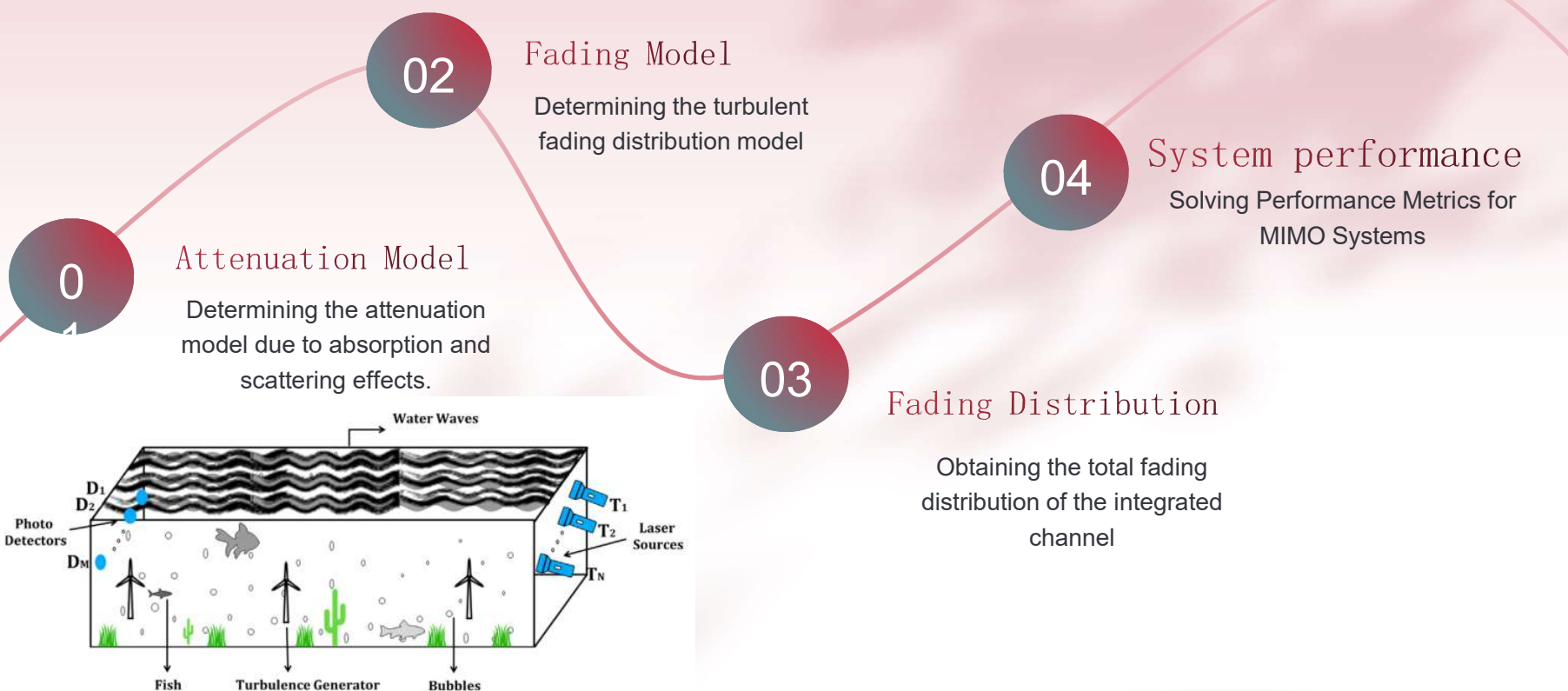


3.17 多通道信道建模—OAM

Power Spectrum	Journal	Author	OAM Beams	Propagation properties	Performance Analysis
Li, Zhang [2019] [Anisotropic]	2019 AO	Dongyu Yang	BG	MCF Received probability of OAM modes	Channel Capacity
Nikishovs [Anisotropic]	2019 Waves Random Complex	Mingyu Chen	PCMBC	Mode probability density of OAM modes Normalized energy weight of OAM signal modes Normalized energy weight of OAM crosstalk modes	
Li, Zhang [2019] [Anisotropic]	2020 AO	Zonghua Hu	PV	OAM mode detection probability	
Elamassie	2021 OC	Yixin Zhang	DARR	Received conditional probability of OAM signal modes	Channel Capacity
Li, Zhang [2019] [Anisotropic]	2021 AO	Shuai Ling Wang	Lommel–Gaussian	MCF OAM detection probability	Channel Capacity



3.18 多通道信道建模—MIMO





3.18 多通道信道建模—MIMO

Journal	Author	Fading Type	Modulation Format	Performance Analysis	Ref
2020 OC	Prasad Naik Ramavath	Log-Normal	OOK	<BER>	[1]
2018 TVT	Mohammad Vahid Jamali	Log-Normal	BPPM	<BER>	[2]
2017 TOC	Mohammad Vahid Jamali	Log-Normal	OOK	<BER>	[3]

- [1] Ramavath P N , Udupi S A , Krishnan P . High-speed and reliable Underwater Wireless Optical Communication system using Multiple-Input Multiple-Output and channel coding techniques for IoUT applications[J]. Optics Communications, 2020, 461:125229.
- [2] [1] Jamali M V , Nabavi P , Salehi J A . MIMO Underwater Visible Light Communications: Comprehensive Channel Study, Performance Analysis, and Multiple-Symbol Detection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, PP(99):1-1.
- [3] [1] Jamali M V , Salehi J A , Akhoundi F . Performance Studies of Underwater Wireless Optical Communication Systems with Spatial Diversity: MIMO Scheme[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3):1176-1192.



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

目录

1

研究背景与意义

2

研究现状与挑战

3

技术路线与分析

4

工作总结与展望



■ 水下光通信信道建模方法的选择——数值计算 or 实验测量

信道特征获取

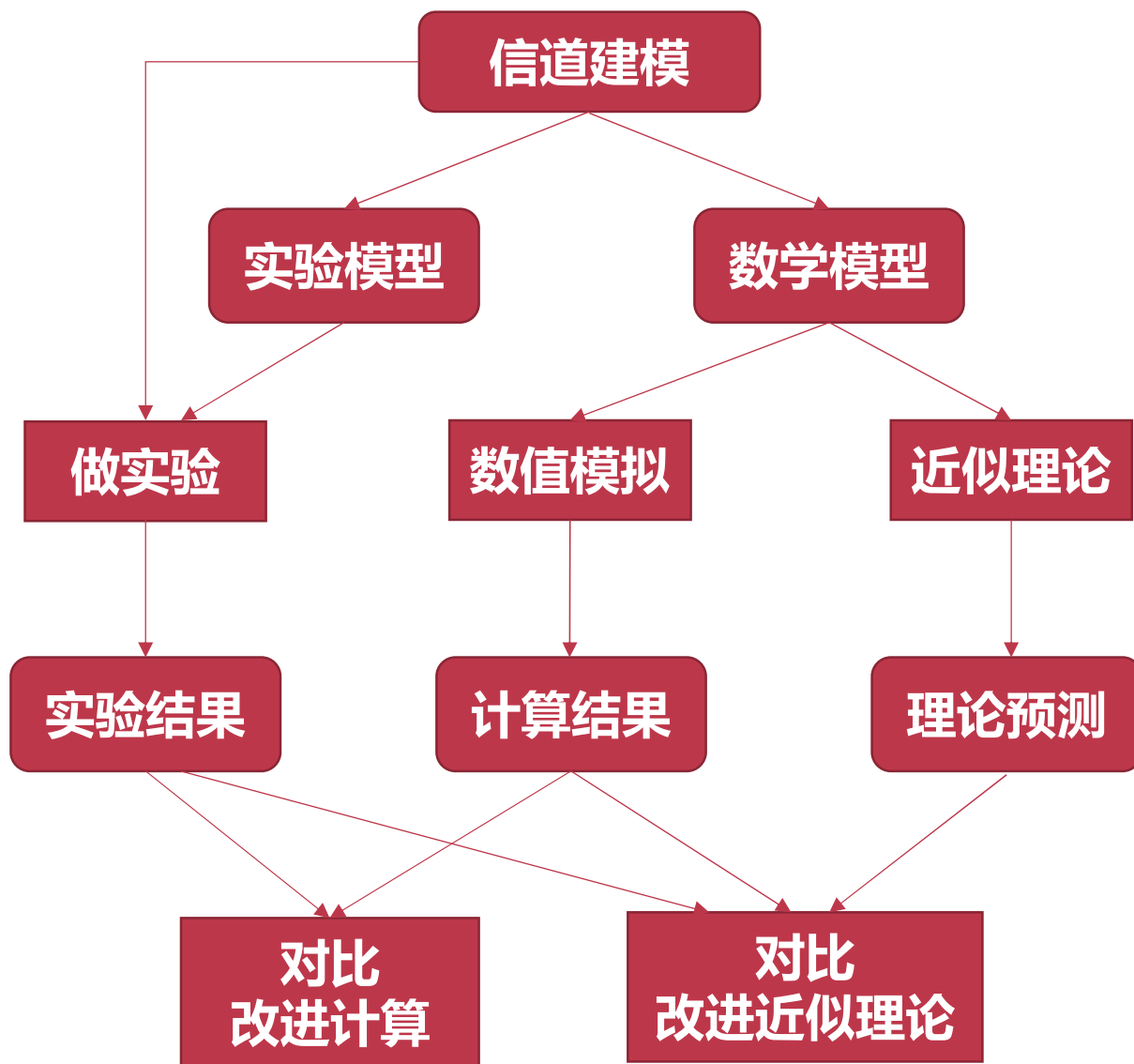
数值计算	实验测量
几乎可以得到所有特征	信道特征十分有限

准确性

数值计算	实验测量
更容易控制建模条件	更“真实”，但要排除干扰因素
简单的信道条件准确性高，复杂多因素的信道准确性低	

成本

数值计算	实验测量
耗时少，成本低	耗时多，成本高



理论、计算与
实验的关系



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

总结与展望

- 加快构建和完善全球海洋光学数据库
- 发展海洋湍流相关基础理论、数值计算方法和实验测量技术
- 综合海洋光学、傅里叶光学、随机电磁理论等交叉领域成果完善水下光传播特性基础理论体系
- 面向中长距离、垂直/斜程信道、OAM/MIMO等水下光通信实际需求构建符合物理规律的数学可达信道模型
- 开发水下光通信信道模拟平台，为系统设计、性能优化、评估验证提供统一的标准信道模型

谢谢各位批评指正！