

采用可见光通信的波长自适应水下光学无线传感器网络

Xin Lin

Research and Development Division, Nakagawa Laboratories, Inc., Tokyo, Japan

【摘要】 针对海洋环境开发和海底资源观测，提出了一种波长自适应的水下光学无线传感器网络（UOWSN）。该网络采用基于发光二极管（LED）的可见光通信（VLC）方法在传感器节点之间构建无线网络，每个传感器节点本身就是一个可见光通信收发器。LED 为非相干光源，既不会像相干激光光源那样对海洋生物造成损伤，也不会损失光辐射固有的高速度性。波长自适应技术用于自适应控制随时间变化的海水浊度和海洋环境。水下一对一图像传输实验验证了所提 UOWSN 的有效性。

【关键词】 UOWSN; VLC; 波长自适应; LED

【基金项目】 日本国土交通省项目基金资助

【收稿日期】 2025 年 7 月 13 日 **【出刊日期】** 2025 年 8 月 10 日 **【DOI】** 10.12208/j.op.20250005

Wavelength-adaptation underwater optical wireless sensor network using visible light communications

Xin Lin

Research and Development Division, Nakagawa Laboratories, Inc., Tokyo, Japan

【Abstract】 A wavelength-adaptation underwater optical wireless sensor network (UOWSN) is proposed for marine environment development and seafloor resources observation. The method of LED-based visible light communication (VLC) is employed for creating the wireless network among the sensor nodes, and each sensor node is a VLC transceiver. The LED is incoherent source, it can neither damage the marine creatures like as a coherent laser source nor lose the inherent high speediness of light radiation yet. The wavelength-adaptation technique is used to adaptive control seawater turbidity and marine environment which both have spatiotemporal change. The effectiveness of proposed UOWSN is demonstrated in the experiments of underwater one-to-one image transmissions.

【Keywords】 UOWSN; VLC; Wavelength adaptation; LED

1 介绍

无线传感器网络（WSN）由多个空间分布的无线终端组成。每个无线终端都是一个自主的传感器节点。每个传感器节点配备无线收发器、微处理器以及电池或能量收集设备。WSN 的传感器节点分散在特定的物理空间中，以从这些无线传感器收集信息^[1]。图 1 显示了网状 WSN。由于 WSN 是一个多点同时测量系统，因此它对于掌握环境情况和物理现象的分布变化非常有效。它也是当前物联网（IoT）系统中使用的核心技术之一^[2]。

另一方面，随着人类在海洋环境中活动的不断扩展，如海洋监测与探索、海上油田勘探等，使得对

水下无线传感器网络（UWSN）的需求日益增加^[3]。海洋环境与资源的发展对包括海洋物理、海洋化学、海洋生物等许多现象的观测与分析提出了许多任务，而这些不同领域之间的数据是相互关联的。因此，在具有多数据的海洋世界中，如何构建智能的 UWSN 也是有趣且重要的，使得不同探测器之间的数据可以相互使用和参考。图 2 示出了海底观测站中的探测器网络。

然而，传统陆地 WSN 技术在海洋环境中的应用存在固有的困难。事实上，将无线电用于水下通信的主要障碍是由于海水的导电特性导致的严重衰减。尤其是高频无线电波的衰减非常高，而且由于

注：本文于 2020 年发表在 Advances in Computer and Communication 期刊 1 卷 1 期，为其授权翻译版本。

目前的陆地无线通信技术通常基于 Gbps 级的高频，因此在水下应用中使用陆地技术实际上是不可能的。

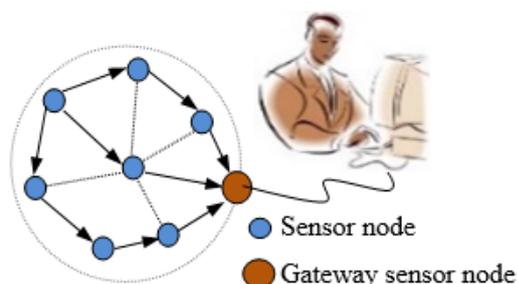
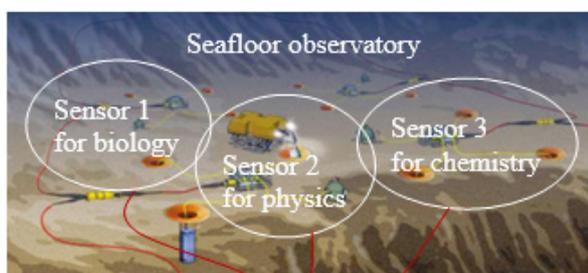


图 1 网状型 WSN



Data in different fields

图 2 海底观测站的探测网

本文利用可见光通信 (VLC) 技术，提出了一种水下光学无线传感器网络 (UOWSN)，针对海水浑浊度等时空变化的海洋环境，采用波长自适应控制的方法。

2 水下光学无线传感器网络

无线电波通信的替代方案是使用可见光波。如图 3 所示，海水在可见光谱中呈现出吸收率较低的窗口^[4]。尤其是在 400-650 纳米之间，水对光相对透明，吸收率最小。此外，由于光波固有的高带宽和空间分段特性，使得水下光无线通信 (UOWC) 技术成为构建 UWSN 最重要的途径^[5]。

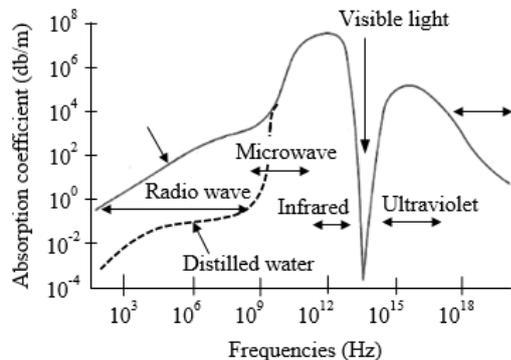


图 3 水中电磁波的吸收系数

2.1 水下光通道

水下光信道的研究对于构建 UWSN 具有重要意义。图 4 给出了可见光在海水中传播的物理模型。

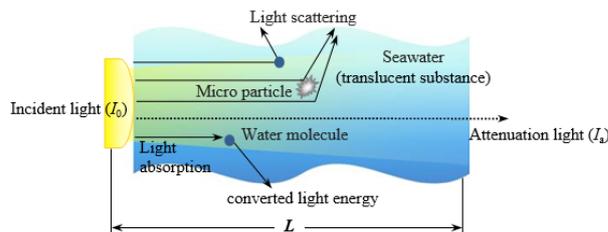


图 4 光在海水中传播的物理模型

天然海水是一种半透明的物质，含有大量微粒和水分子。UOWSN 的性能取决于光在这种“半透明物质”中的传播效果。当入射光 I_0 穿过海水时，由于微粒和水分子的吸收和散射，经过传播距离 L 后变为衰减光 I_a 。该衰减过程的数学模型可以写为：

$$I_a(\lambda, L) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-K(\lambda) \cdot L) \quad (1)$$

$$K(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (2)$$

其中 λ 为入射光波长， $K(\lambda)$ 为海水总衰减系数， $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 分别为吸收系数和散射系数。Hulbert 等人于 1945 年给出了水平光传播方向的 $K(\lambda)$ 实验数据。利用这些数据，得到了与公式 (1) 对应的不同海水类型的光谱强度衰减，并绘制在图 5 中。

图 5 (a) 所示的纯海水类型，可见光的吸收几乎完全由海水分子的衰减所决定，可见光传播衰减最小的理想波长区域位于 400nm~500nm 的蓝绿波段。对于图 5 (b) 所示的高浊度海湾，可见光波段的总吸收主要由有机和无机颗粒的组合所决定，理想的透射波长从蓝绿波段向 550~600nm 左右的绿黄波段偏移。

可见光波在海水中传播时，海水中颗粒物的行为。如图 6 (a) 所示，颗粒物不易被波长较长的红光照射，而容易被波长较短的蓝光照射，如图 6 (b) 所示。当光波照射到颗粒物上时，由于光的散射，其强度会衰减。这就是为什么在海湾等高浊度海水中，波长较长的红光比波长较短的蓝光具有更好的透射率，如图 5 (b) 所示。

另一方面，海水颜色的时空变化[图 7 (a)]也是一种内在噪声，会影响光的传播。深海中的海洋雪[图 7 (b)]是一种外部噪声，由于它是一种肉眼可见的、足够大的有机颗粒，因此能够干扰光链路。

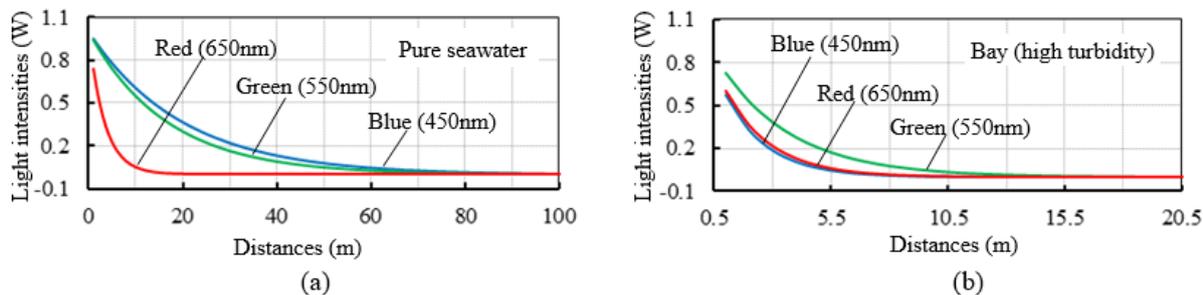


图 5 不同类型海水在水平方向上的光谱强度衰减
(a) 纯海水和 (b) 海湾

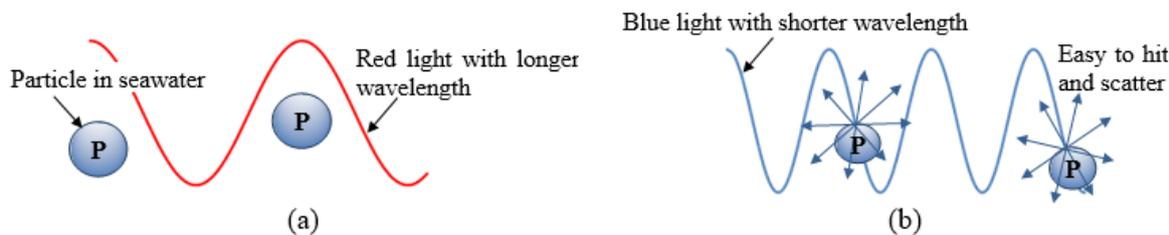


图 6 海水中颗粒物对可见光透射率的影响
(a) 红光和 (b) 蓝光

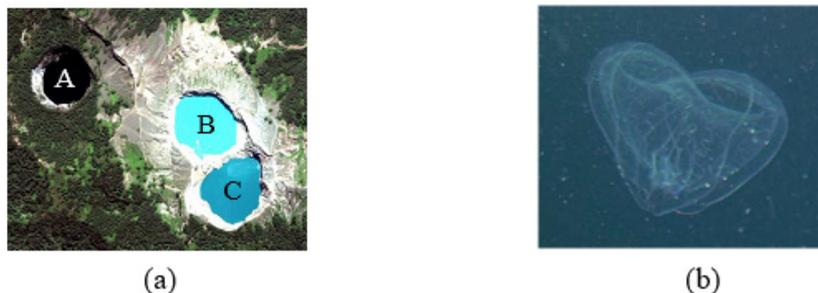


图 7 水下光通道中的噪声
(a) 海水颜色的时空变化，这是一种固有噪声（图片由华威大学的 Johnson 提供）和 (b) 日本相模湾的海洋雪（图片由 Kitamura 提供，2006 年）

2.2 水下链路配置

还应考虑传感器节点之间的水下链路配置，以及可见光通信系统中水下链路与地面链路的区别。表 1 列出了发射器和接收器之间典型的水下漫射链路配置^[6]。

视线 (LOS) 是指从接收器看到发射器的能力。LOS 链路是最简单的链路类型，即发射器 (Tx) 和接收器 (Rx)。非视距链路利用海面反射来克服水下障碍。当需要双向通信时，视距反射器链路很有用，但接收器功率太低，无法支持水下传感器节点的完整收发器。理论上，所有这些配置都具有足够好的误码率 (BER)，并且适用于 15 米以下的短距离水下数据传输^[7]。

对于浑浊的自然海水，光传播的衰减主要由散

射引起，发射器的宽视场角 (FOV) 可以补偿增加的衰减。非相干可见光 LED (发光二极管) 最适合这种漫射链路应用。

2.3 构建自适应 UOWSN

与陆地环境中的 WSN 类似，海洋环境中的 WSN 也有不同的类型，以适应不同的应用。图 8 展示了不同类型的 UWSN 的链路拓扑结构。

为了构建一个适用于海底观测站的 UOWSN (见图 2)，采用网状 WSN 拓扑结构，多点同时测量和传输来自不同探测器的数据，并在无需人工操作的情况下相互共享这些数据。波长自适应控制技术^[8]用于帮助克服图 5 所示不同类型海水中的“光谱强度衰减”。传感器节点之间的链接是“LOS 扩散”类型配置，因为它更容易实现并且对于 UOWC 来说最节能。

表 1 UOWC 的典型扩散链接

LOS diffuseness	Non-LOS Diffuseness	LOS diffuseness retroreflector

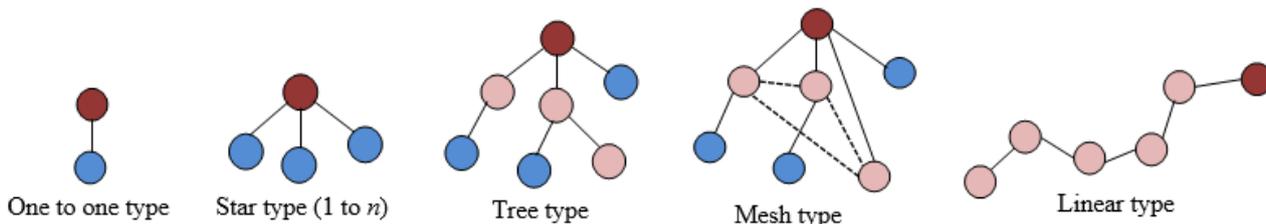


图 8 不同类型的 UWSN 链路拓扑结构

本研究提出的网状 UOWSN 如图 9 所示。它由一个网关传感器节点（即主节点）和多个传感器节点（即子节点）组成。每个节点与其他节点连接形成网状网络，从而生成多条通信路径，这些路径协同地将数据通过网状网络传输到陆地基站。传感器节点之间的距离约为 3-10 米。每个传感器节点的数据通过网关节点远距离传输到陆地基站。网关节点与陆地基站之间的链路是光纤。

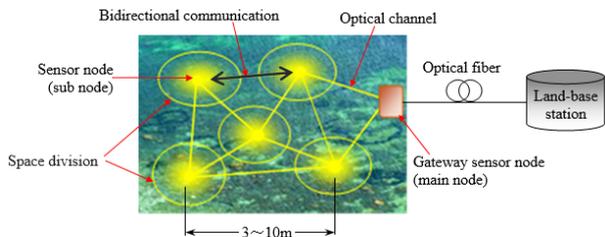


图 9 网状型 UOWSN

每个传感器节点为一个基于波长自适应 LED 的 VLC 收发器，其控制原理如图 10 所示。每个 VLC 收发器当传感器节点安装到海底探测器中时用于双向数据传输。这些传感器节点之间的链路为海水光通道，可见光的空间划分和可见性可以保证每个传感器节点在空间和时间上都是独立且可识别的。

为了实现波长自适应控制，收发器采用多芯片白光 LED 作为光源。图 11 是本系统采用的包含 R（红）、G（绿）、B（蓝）三颗芯片的白光 LED 模块。每颗芯片均具有独立的波长峰值，可作为独立通道，针对不同海水类型进行自适应控制。该 LED

为非相干光源，既不会像相干激光那样对海洋生物造成损伤，也不会损失光速。此外，它还可以作为水下照明的照明设备。

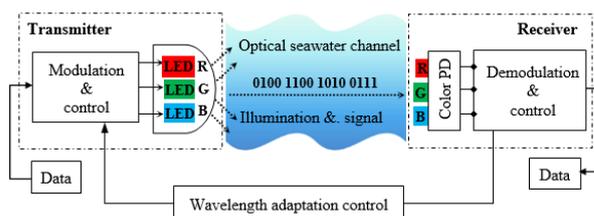


图 10 基于 LED 的 VLC 收发器，波长适应控制

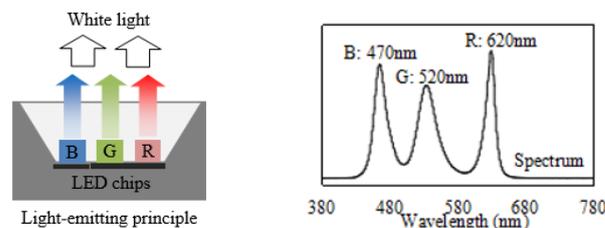


图 11 三芯片白光 LED 模块

为了能够同时高精度地检测 LED 光源发出的三种颜色的光，在收发器的接收端，采用了带有三原色传感器芯片的光电二极管（PD），如图 12 所示。三个传感器芯片以马赛克形状排列在 PD 的光检测表面上。

基带强度调制是光无线通信中采用的主要载波技术。不归零关键控（OOK-NRZ）和 L 电平脉冲位置调制（L-PPM）是两种最常见的基带强度调制方案^[9]。图 13 分别给出了 OOK-NRZ 和 4-PPM（L-

PPM) 的编码方式。=4) .OOK-NRZ 以二进制“0”和“1”为单位传输数据，4-PPM 以符号为单位传输数据，符号为 4 比特串。虽然 OOK-NRZ 方案具有更高的数据传输速率，但 L -PPM 产生的平均功率需求随着 L 的增加而稳步下降。降低的平均功率要求使得 L -PPM 更适合水下数据传输，尤其对于深海环境，需要更低的功耗。

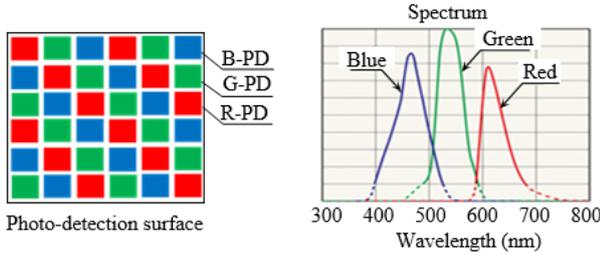


图 12 三传感器彩色光电二极管。

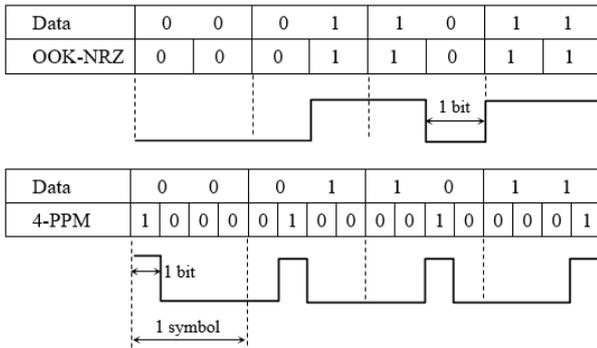


图 13 OOK-NRZ 与 4-PPM 的编码方式

水下数字光无线通信采用二进制编码实现光数据传输，并使用 BER 参数描述海水光信道的性能。BER 是一个条件概率，必须对随机数字信号的概率密度函数取平均值才能确定无条件 BER。 L -PPM 的 BER 定义为：

$$BER_{L-PPM} = \frac{L}{2} Q\left(\sqrt{\frac{L \log_2 L}{2}} \sqrt{SNR}\right) \quad (3)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (x \geq 0) \quad (4)$$

其中，SNR 是通信系统海水信道和电子电路中的平均信噪比。利用公式 (3) 和公式 (4)，可以计算出 L -PPM 方案达到一定 BER 所需的 SNR，不同 L 值下的 BER 性能如图 14 所示。

例如，随着 L 的增加，SNR 要求会降低，以达到 $BER 10^{-8}$ ， L 的信噪比=2、4、8、16 分别约为 15、9、4.5、0.5。L 越大，BER 性能越好，但 L 的增加

会导致通信速率的下降。 $L=4$ 是常见水下光无线通信中采用的优选值，因为 4-PPM 方案在 BER 和速度方面都具有适当的效率。

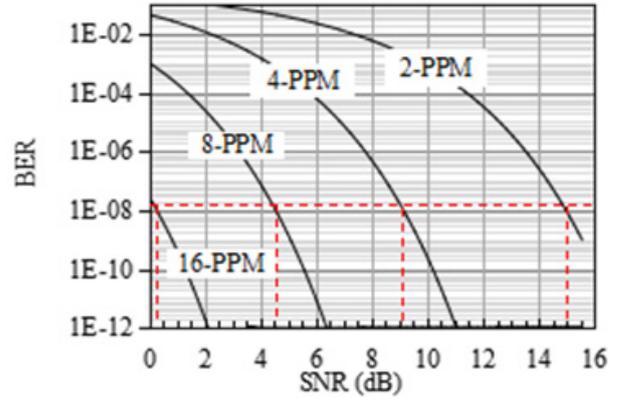


图 14 具有不同 L 值的 L-PPM 的 BER 与 SNR 关系

3 实验与结果

使用如图 15 所示的基于 LED 的收发器，在一对一链路之间实现了水下双向图像 (640×480 像素) 传输实验。该收发器的原理已在图 10-12 中描述。基带光强度调制采用 4-PPM 方法。

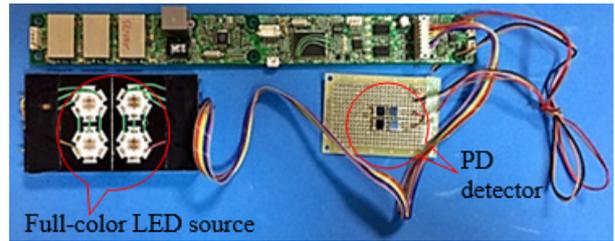


图 15 基于 LED 的 VLC 收发器原型

图 16 示出了使用图 15 中的收发器的系统的两种工作模式。图 16 (a) 是使用交叉 LAN (局域网) 电缆进行具有固定 IP 地址的 TCP/IP 通信的有线通信模式，图 16 (b) 是通过无线 LAN 集线器的无线工作模式。

不同波长光的图像传输结果如图 17 所示。实验中，将收发器放置在一个透明的防水容器中，该容器对可见光的透过率高达 93%左右，然后将防水容器放入一个水槽宽度为 600mm。水槽内水的浊度通过白砂颗粒调节。采用水流装置产生与自然水相似的动态水流。使用波长为 490nm 的蓝绿光和波长为 590nm 的绿黄光来演示所提出的波长自适应方法的数据传输有效性。低浊度和高浊度水中的控制方法。稳定数据传输速率为 5Mbps，BER 小于 10^{-8} 。

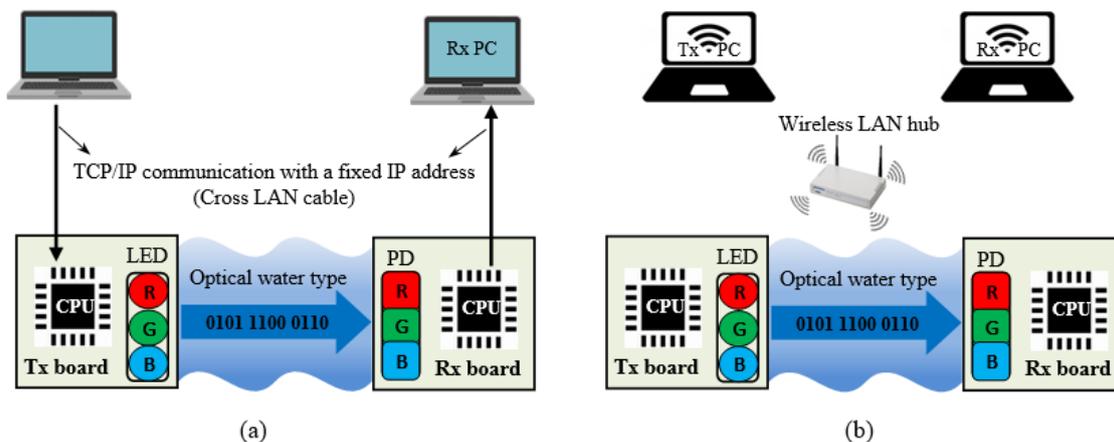


图 16 系统工作模式
(a) 有线模式和 (b) 无线模式

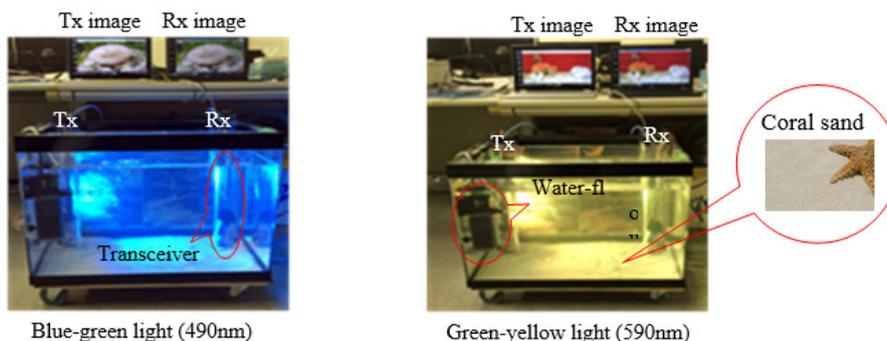


图 17 不同光波长的水下一对一图像传输结果

4 结论

本研究旨在有效开发海洋环境与资源，非相干 LED 是一种极具吸引力的光源，它不仅可以传输数据且不会对海洋生物造成伤害，还可以作为水下照明设备。因此，利用基于 LED 的可见光通信技术，构建了一种具有波长自适应控制功能的网状 UOWSN，用于水环境中的数据传输。研制了基于 LED 的可见光通信收发器样机，进行了不同光波长的一对一图像数据传输实验，在低浊度和高浊度水体中均获得了良好的误码率和数据速率。进一步的研究包括：

- (1) 进行一对多、多对一数据传输的水下光学实验。
- (2) 低功耗水下链路方法。
- (3) 光学海水通道垂直方向特性。

参考文献

[1] Dargie, W., Poellabauer, C. (2010). Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. Wiley.

[2] Ootsuka, H., Kazama, H. (2014). A study of system integration related to advanced IT networks in IoT. IEICE technical report, 114(166), pp. 169-176.

[3] Detweiler, C., Vasilescu, I., Rus, D. (2007). An underwater sensor networks with dual communications, sensing, and mobility. OCEANS, pp. 1-6.

[4] Nakao, S. (1987). Attenuation of electromagnetic waves in seawater. Defense Technology, pp. 22-30.

[5] Ghelardoni, L., Ghio, A., Anguita, D. (2012). Smart underwater wireless sensor networks. IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, pp. 1-5.

[6] Johnson, L. J., Jasman, F., Green, R. J., Leeson, M. S. (2014). Recent advances in underwater optical wireless communications. Underwater Technology, 32(3), pp. 167-175.

[7] Arnon, S. (2010). Underwater optical wireless communi-

- cation network. *Optical Engineering*, 49, pp. 1-6.
- [8] Lin, X. (2017). Underwater wireless communication system of adaptation wavelength using visible light. *IEICE Trans. Fundamentals*, E100-A(1), pp. 185-193.
- [9] Manea, V., Dragomir, R., Puscoc, S. (2011). OOK and PPM modulations effects on bit error rate in terrestrial laser

transmissions. *Telecomunicatii Anul LIV*, nr. 2, pp. 55-61.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS