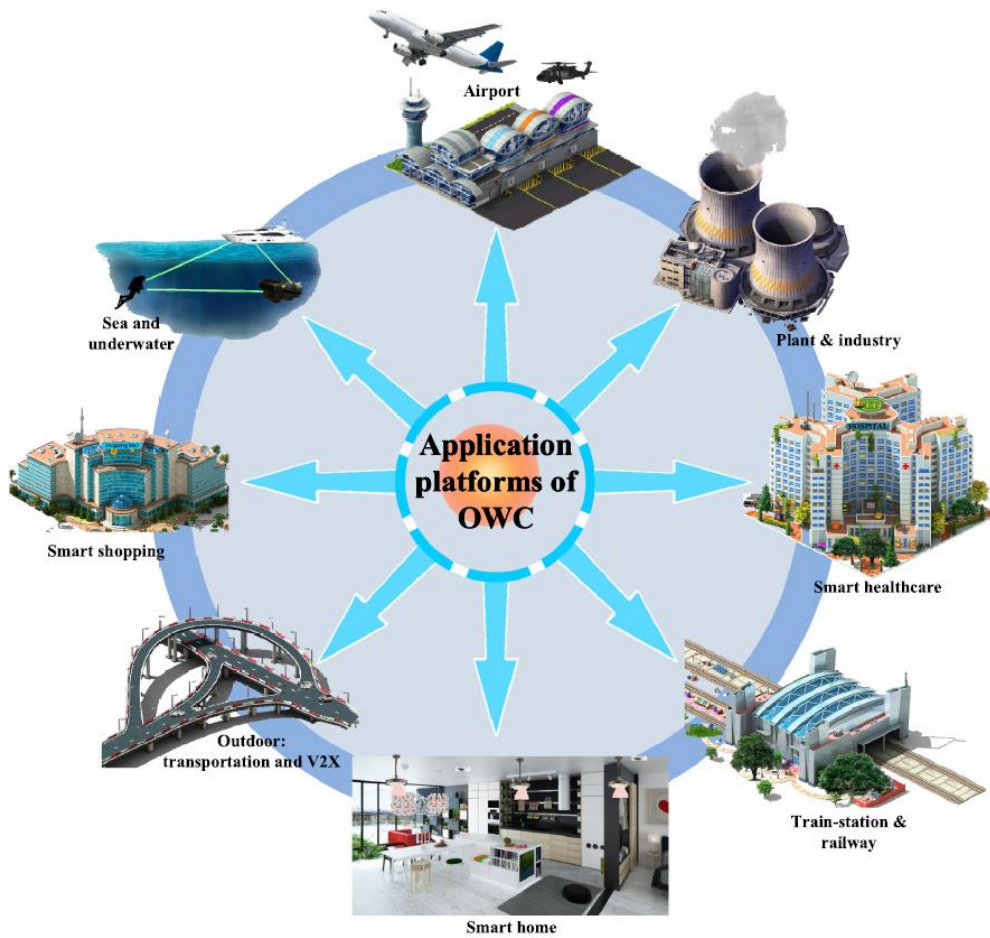


# 从 5G 到 6G,无线电通信+无线光通信? —— 聊聊 OWC

临菲电科



此图来自参考文献[2]

长波 → 短波 → 超短波 → 微波 → 太赫兹 → 光!

## 无线通信

最初的无线通信是“低频”的无线通信。一开始是长波，可以沿着地球表面传播，没啥阻挡，只要功率足够大，可以传很远；然后是短波，短波有地波传播和天波传播，天波一跳可以传上千公里；这些最早的无线通信，至今仍然有用武之地。后来，超短波、微波（包括毫米波）大行其道，成了无线通信的主战场。

过去，无线通信的发展，可以说是从“低端频率”向“高端频率”不断发展，未来呢？依然如此！太赫兹、光无线，会登上历史舞台。

OWC 这个缩写近年来变得比较流行，它的全文是：Optical Wireless Communication，即光无线通信。“光无线通信”中，“光”是指信号的传播介质为“光”，“无线”是指不需要“线”（例如光纤）来传播光。

尽管光波和无线电波都属电磁波，但人们还是习惯把“光通信”与“电通信”区别开来。

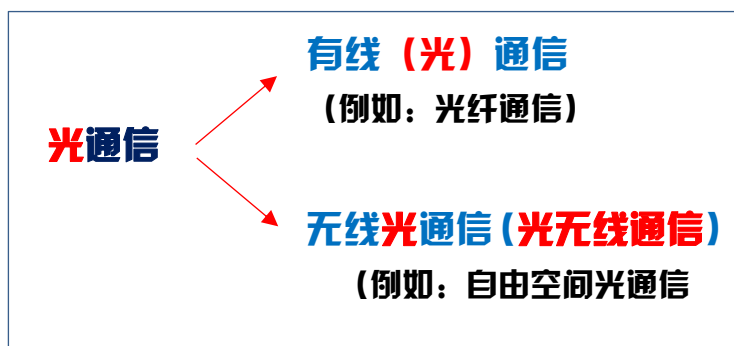
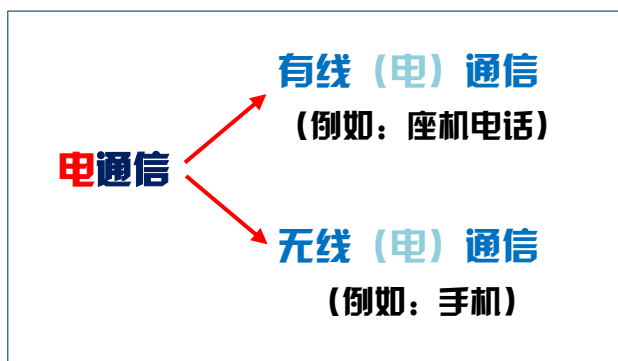
由于“无线**电**通信”已经先入为主地把“电”省掉，成为了“无线通信”，那“无线**光**通信”的“光”就不能再省啦！当然，如果按 OWC 直译叫“光无线通信”的话，就没啥混淆的了。

不过，本文有时还是像很多人那样说“无线光通信”。当然，“无线光通信”≠“无线通信”+“光通信”！

还是有人想把“无线电通信”和“无线光通信”统一起来，本来它们也就在“电磁频谱”的统一概念之下。但是，同在“电磁频谱”的“两种无线”通信如何区分开来？有人就把如今大家说的无线通信叫做“射频通信”，英文是“Radio Frequency (RF) Communication” [1][2]，它们说的 RFC，其实就是我们说的无线**电**通信。

这样，“无线通信”就有了比以前更丰富的内涵，它就包含了“射频（无线）通信”和“光无线通信”。

本文中，当要与“无线**电**通信”相提并论的时候，我们叫 OWC “无线**光**通信”；但当与英文保持一致更为方便时，我们就说“光无线通信”。



**无线光通信 ≠ 无线通信 + 光通信**

**无线通信 = 射频通信 (RFC) + 光无线通信**

## 无线电通信 (RFC) 的频段

无线电通信即前面说的射频无线通信, 至于射频 (RF) 的波段究竟是多少, 好像并没有专门、统一的权威定义。

## 先说说 RF 的低端

百度百科说：射频（RF）“表示可以辐射到空间的电磁频率，频率范围从 300KHz~300GHz 之间”。不过，能不能“辐射到空间”还要看天线能做多大，如果天线能做很大很大的话，能“辐射到空间”的频率就可以很低，甚至低于 300KHz。例如，长波通信，它的波长范围为 10~1km，“射频（RF）”就是 30~300kHz，所以又叫低频（LF）通信；还有更低 RF 的通信：甚低频（VLF）通信，频率为 3~30kHz。为什么要用这么低的频率呢，做海上海下通信的人会很清楚，本文后面讲水下通信的时候，也会讲到。

也有的文献就把 RF 的低端拉到了 3KHz：“The RF band lies between 3 kHz and 300 GHz of the electromagnetic spectrum.” [2].

## 再说说 RF 的高端

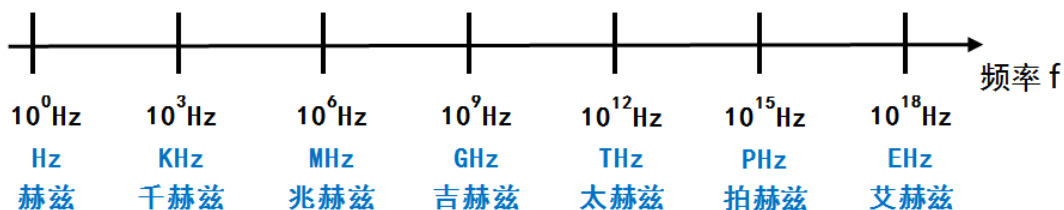
上面说的 RF 的高端是 300GHz，是否合适呢？300GHz 是什么概念？

注意！30 GHz~300 GHz 对应的波长是 10 mm~1 mm，所以 300GHz 是毫米波的高端！

那么 RF 的高端是不是就是毫米波的高端 300 GHz？有人说：别忘了太赫兹，我们正在做太赫兹呢！

太赫兹（Terahertz, THz），是电磁波频率的单位，1THz=1000GHz，太赫兹波是比毫米波更高频率的电磁波。不少人说太赫兹是指从毫米波的高端 300 GHz（即 0.3THz）到远红外光边缘 3000 GHz（即 3THz），也有人说从 0.1THz 开始就算太赫兹了。不管他们怎么说，把 RF 的高端说成 3000GHz 好像比较合适，因为再高就到光那里了。

说了很多，RF 这个“射频”究竟是多少？姑且就算从 KHz 到 THz 吧。在重复一下，前面所谓的“射频 RF 通信”，就是指现在大家所说的“无线（电）通信”，从长波、短波、超短波、微波（包含毫米波）到正在开发的太赫兹！



根据 2018 年的《中华人民共和国无线电频率划分规定》，无线电频谱可分为下面表中的 14 个频段，最高端是 300-3000GHz。

带号	频带名称	频率范围	波段名称	波长范围
-1	至低频 (TLF)	0.03—0.3Hz	至长波或千兆米波	10 000—1 000 兆米 (Mm)
0	至低频 (TLF)	0.3—3Hz	至长波或百兆米波	1 000—100 兆米 (Mm)
1	极低频 (ELF)	3—30Hz	极长波	100—10 兆米 (Mm)
2	超低频 (SLF)	30—300Hz	超长波	10—1 兆米 (Mm)
3	特低频 (ULF)	300—3 000Hz	特长波	1 000—100 千米 (km)
4	甚低频 (VLF)	3—30kHz	甚长波	100—10 千米 (km)
5	低频 (LF)	30—300kHz	长波	10—1 千米 (km)
6	中频 (MF)	300—3 000kHz	中波	1 000—100 米 (m)
7	高频 (HF)	3—30MHz	短波	100—10 米 (m)
8	甚高频 (VHF)	30—300MHz	米波	10—1 米 (m)
9	特高频 (UHF)	300—3 000MHz	分米波	10—1 分米 (dm)
10	超高频 (SHF)	3—30GHz	厘米波	10—1 厘米 (cm)
11	极高频 (EHF)	30—300GHz	毫米波	10—1 毫米 (mm)
12	至高频 (THF)	300—3 000GHz	丝米波或亚毫米波	10—1 丝米 (dmm)

## 无线光通信 (OWC) 的频段

那么，无线光通信，或是或光无线通信 OWC，又包含些啥频段呢？

当前说的 OWC 是指用红外线 (infrared, IR)、可见光 (visible light, VL) 或紫外线 (ultraviolet, UV) 进行的通信，学究一点的说法就是 OWC 的传播介

质是红外线 IR、可见光 VL、紫外线 UV。

**光无线通信 (OWC):**

**红外 (IR)、可见光 (VL)、紫外 (UV)**

## 红外线 IR

百度百科说,红外线是波长介于微波与可见光之间的电磁波,波长在 1mm 到 760 纳米 (nm) 之间,比红光长的非可见光。

红外又分为:近红外(Near Infra-red, NIR), 波长 0.7~2.5  $\mu\text{m}$ ; 中红外(Middle Infra-red, MIR), 波长 2.5~25  $\mu\text{m}$ ; 远红外(Far Infra-red, FIR), 波长 25~500  $\mu\text{m}$ 。

## 可见光 VL

百度百科说,人眼可见光的范围是  $4.2 \times 10^{14} \sim 7.8 \times 10^{14} \text{Hz}$ , 也就是 420THz~780THz。

维基百科上说的可见光的波长是 400nm~700nm, 频率范围是 430THz~790THz。

## 紫外线 UV

百度百科说,紫外线指的是电磁波谱中波长从 10nm~400nm 辐射的总称,不能引起人们的视觉。

维基百科说的与百度百科完全一致,紫外线的波长是 10nm~400nm, 频率范围是 790THz~30PHz。

## IR、VL、UV 通信特点

这里先给一个表,从整体上说一下利用 IR、VL 和 UV 作为传输媒介的 OWC,具体系统的介绍在后面就会看到。

IR、VL、UV 通信概要，来自文献[2]

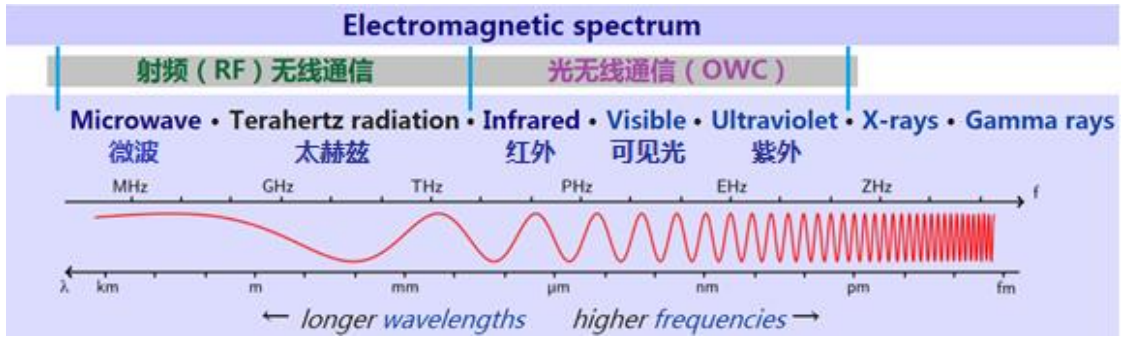
	红外 IR	可见光 VL	紫外 UV
波长	760nm-1mm	360-760nm	10-400nm
通信距离	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiFi 和 OCC: 中短距离</li> <li>• FSOC: 超短、短、中、远、超远距离</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VLC、LiFi、OCC: 短、中距离</li> <li>• FSOC: 超短、短、中、远、超远距离</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiFi: 短、中距离</li> <li>• FSOC: 超短、短、中、远、超远距离</li> </ul>
优势	人眼不可见，适合无需照明的场合	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对人类安全</li> <li>• 可用于同时照明和通信</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 人眼不可见，适合无需照明的场合</li> <li>• NLOS 下任有可能高速率</li> </ul>
局限性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 并非对人类总是安全的</li> <li>• LOS; NLOS (利用 IR 反射) 速率很低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LOS; NLOS (利用光反射) 数据速率很低</li> <li>• 在无需照明时有光可见</li> </ul>	对人类不安全
通信技术	LiFi, OCC, FSO	VLC, LiFi, OCC, FSO	LiFi, FSO
照明	无	有	无

LiFi、VLC、OCC、FSO 的介绍在后面。

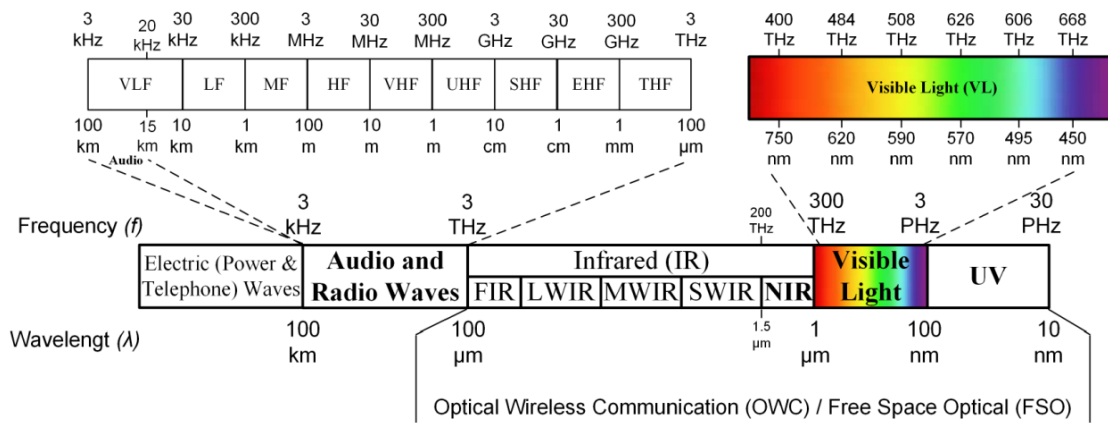
## 全频谱

这里给几个图表，以不同形式描述电磁频谱，根据自己喜好，可以重点看一个。

首先，在维基百科上找了个图，把它翻转过来（以便做无线电通信的习惯从左至右频率增高），再把 RF 无线通信和光无线通信（OWC）放在相应的频段，我们就看到了“RFC+OWC”即“无线电通信+无线光通信”的频谱全景。



再给一个图，来自参考文献[5]。它把电磁频谱分为两部分，一部分是无线电通信、另一部分无线光通信，很清楚。英文的翻译见后面，还有一张大表。



根据文献[2]中的一个表格，经过整理和翻译，形成如下一个表格，很详细。这个表格我们曾经在“临菲信息技术港”公众号发过的。



## Lynchpin 临菲 电磁频谱中英文对照 Electromagnetic Spectrum

Spectral category/sub-category 频谱类别/子类		Frequency 频率	Wavelength 波长		
Radio wave 无线电波	Very low frequency (VLF) 甚低频	3 - 30 kHz	100 - 10 km 甚长波		
	Low frequency (LF) 低频	30 - 300 kHz	10 - 1 km 长波		
	Medium frequency (MF) 中频	0.3 - 3 MHz	1000 - 100 m 中波		
	High frequency (HF) 高频	3 - 30 MHz	100 - 10 m 短波		
	Very high frequency (VHF) 甚高频	30 - 300 MHz	10 - 1 m 米波		
	Ultra-high frequency (UHF) 特高频	0.3 - 3 GHz	1 - 0.1 m 分米波		
	Super-high frequency (SHF) 超高频	3 - 30 GHz	100 - 10 mm 厘米波		
	Extremely high frequency (EHF)/Millimeter wave 极高频/毫米波	30 - 300 GHz	10 - 1 mm 毫米波		
	Microwave 微波	P-Band P波段	0.225 - 0.39 GHz	1330 - 769 mm	
		L-Band L波段 (又: 1-2GHz)	0.39 - 1.55 GHz	769 - 193 mm	
		S-Band S波段 (又: 2-4GHz)	1.55 - 5.2 GHz	193 - 57.7 mm	
		C-Band C波段 (又: 4-8GHz)	3.9 - 6.2 GHz	76.9 - 48.4 mm	
		X-Band X波段 (又: 8-12GHz)	5.2 - 10.9 GHz	57.7 - 27.5 mm	
		Ku-Band Ku波段	12 - 18 GHz	25 - 16.67 mm	
K-Band K波段 (又: 18-27GHz)		10.9 - 36 GHz	27.5 - 8.33 mm		
Q-Band Q波段 (Ka: 27-40GHz)		36 - 46 GHz	8.33 - 6.52 mm		
V-Band V波段 (又: 40-75GHz)		46 - 56 GHz	6.52 - 5.35 mm		
W-Band W波段		56 - 100 GHz	5.35 - 3 mm		
Optical 光	IR 红外	Far infrared (FIR) 远红外	0.3 - 20 THz	1-0.015 mm	
		Thermal infrared (TIR) 热红外	Long-wavelength infrared (LWIR) 长波红外	20 - 37.5 THz	0.015-0.008 mm
			Mid-wavelength infrared (MWIR) 中波红外	37 - 100 THz	0.008-0.003 mm
		Short-wavelength infrared (SWIR) 短波红外	100 - 214.3 THz	3000000 - 1400 nm	
		Near infrared (NIR) 近红外	214.3 - 394.7 THz	1400-760 nm	
	Visible light 可见光	Red 红	394.7 - 491.8 THz	760 - 610 nm	
		Orange 橙	491.8 - 507.6 THz	610 - 591 nm	
		Yellow 黄	507.6 - 526.3 THz	591 - 570 nm	
		Green 绿	526.3 - 600 THz	570 - 500 nm	
		Blue 蓝	600 - 666.7 THz	500 - 450 nm	
		Violet 紫	666.7 - 833.3 THz	450 - 360 nm	
	UV 紫外光	Ultraviolet A (UVA) 紫外光A	750 - 952.4 THz	400 - 315 nm 长波紫外	
		Ultraviolet B (UVB) 紫外光B	952.4 - 1071 THz	315 - 280 nm 中波紫外	
		Ultraviolet C (UVC) 紫外光C	1.071 - 3 PHz	280 - 100 nm 短波紫外	
		Near ultraviolet (NUV) 近紫外	0.750 - 1 PHz	400 - 300 nm	
		Middle ultraviolet 中紫外	1 - 1.5 PHz	300 - 200 nm	
		Far ultraviolet 远紫外	1.5 - 2.459 PHz	200 - 122 nm	
Hydrogen Lyman-alpha 氢莱曼-α		2.459 - 2.479 PHz	122 - 121 nm		
Extreme ultra violet (EUV) 极紫外		2.479 - 30 PHz	121 - 10 nm		
Vacuum ultraviolet 真空紫外		1.5 - 30 PHz	200 - 10 nm		
X-ray X-射线	Soft X-ray 软X-射线	30 - 3000 PHz	10 - 0.1 nm		
	Hard X-ray 硬X-射线	3 - 300 EHz	100 - 1 pm		
Gamma ray/ Cosmic ray 伽马射线/宇宙射线	300 - 30000 EHz	1000 - 10 fm			

上表中微波部分的频段划分，与平常大家熟悉的不太一样，也许是它考虑的是国外的通信频段吧。为了弥补这个不足，我们给出我国微波频段的划分，见下表。

常用字母代码和业务频段对应表（来源：中华人民共和国无线电频率划分规定，2018）

字母代码	雷 达		空间无线电通信	
	频率范围 (GHz)	举例 (GHz)	标 称 频 段	举例 (GHz)
L	1-2	1.215-1.4	1.5GHz 频段	1.525-1.710
S	2-4	2.3-2.5 2.7-3.4	2.5GHz 频段	2.5-2.690
C	4-8	5.25-5.85	4/6GHz 频段	3.4-4.2 4.5-4.8 5.85-7.075
X	8-12	8.5-10.5	-	
Ku	12-18	13.4-14.0 15.7-17.3	11/14GHz 频段 12/14GHz 频段	10.7-13.25 14.0-14.5
K (注)	18-27	24.05-24.25	20GHz 频段	17.7-20.2
Ka (注)	27-40	33.4-36.0	30GHz 频段	27.5-30.0
V	40-75	46-56	40GHz 频段	37.5-42.5

（原表注：对于空间无线电通信，K 和 Ka 频段一般只用字母代码 Ka 表示；相应代码及频段范围非正式标准，仅作简化称呼参考之用。）

## LED 可见光通信

可见光通信 VLC (Visible Light Communication) 可能是当前光无线通信中最热闹的了。

通过光来发信号是众所周知的事，例如手电筒就是一个即可照明又可以发信号的通信工具，像发电报那样控制手电筒的开关就可以发送摩尔斯电码，当然，别在乎这种“电报”的传输速率。

所以，“闪烁”的光，可以是一种通信信号，只要它的闪烁能反映我们要传达的信息就行。

## LED ——光信号“发射天线”

可见光通信（VLC）很多都采用 LED 灯作为发射器，接收器用光电探测器（photodetectors, PD）。LED 相当于 RF 无线通信系统中的发射天线，PD 相当于接收天线。不同的是，RF 的一个天线既可以收又可以发，但 VLC 的收、发还没办法用同一个“天线”来执行。当然，LED 比“天线”的好处在于它是灯具——具有照明功能——一边照明边发射通信信号，是不是可以节省通信用的能源？

基于 LED 的可见光通信，自然在需要照明的地方最实惠，家里的卧室、书房、客厅，公司的会议室、办公室、接待室，商场、机场、车站、码头、医院、机关、学校……,无处不需要照明，“照明即通信”！把 LED 安装在天花板上，它们一个个就是发射信号的“灯泡天线”！

LED 灯怎么可以发射通信信号？简单地说就是它可以快速闪烁，快到人眼感觉不出来，就像过去的胶片电影，24 帧每秒的断续画面，我们看起来却是连续的。

LED 灯的闪烁是靠对光很敏感（而不是像我们人眼那样反映迟钝）的光电探测器 PD 来感知的，也就是光电二极管，PD 把光的变化转变为电信号，后面的处理就和一般的通信原理差不多了。

## LED 的麻烦事

LED 光通信也有些麻烦事，例如，要在电脑笔记本或手机上安装一个或几个 LED 灯，还是比较麻烦，特别是，手机开着个 LED 灯进行通信好像也不太舒服，所以，目前 LED 光通信主要用于下行，上行可以考虑用红外线等。

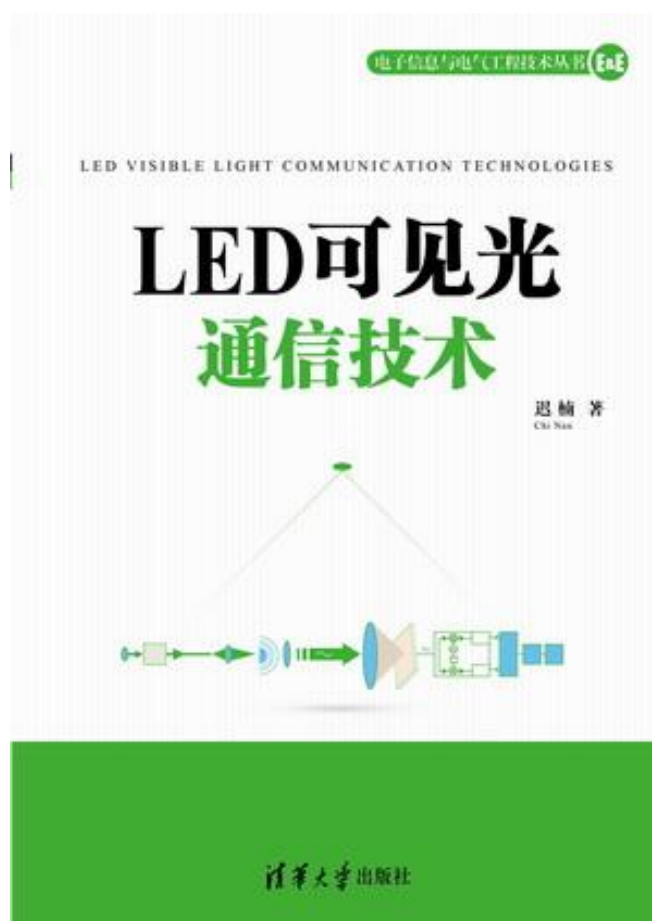
LED 光的另一个麻烦事可能是由谁来把那么高速的数据传到 LED 灯上。有个 PLC（Power Line Communication），叫电力线通信，本来它可以很方便地把信号送到天花板的 LED 上，但电力线的带宽差太多了，况且电力线的信号传输特性也不怎么样。还是直接拉光纤？或者干脆把光纤和电力线做在一起？

## 重要发展

关于用 LED 光进行通信的早期论文，有一个日本学生在 2004 年读博士的时候，在 IEEE Transactions on Consumer Electronics 发了一篇长文[3]，现在这篇文

章在 IEEE Xplore 上的全文阅读 (Full Text Views) 超过了 2 万, 上千次被引用, 到现在还有人看这篇文献。

中国 LED 光通信的研究和开发也不错, 复旦大学和解放军信息工程大学等单位做了不少贡献。复旦大学迟楠教授在 2014 年出版了专著《LED 可见光通信技术》(清华大学出版社); 解放军信息工程大学在 2018 年中国首届中国国际智能产业博览会上, 发布了全球首款商品级超宽带可见光通信专用芯片组, 中国工程院院士邬江兴教授进行了现场演讲。





还想说一下，LED 灯也可以构成阵列用，就像天线阵那样，可以有 LED 的 MIMO 系统，可以进行波束形成（beamforming）或预编码（precoding）等等。

## LiFi 与 WiFi

现在说一下 LiFi。LiFi 是“Light fidelity”的缩写，直译就是“光保真”。有不少人喜欢说可见光通信就是 LiFi，其实未必，就像不能认为无线通信就是 WiFi 一样。

LiFi 虽然也属于光无线通信，但它不一定完全是可见光通信（VLC）；反过来，可见光通信系统，未必就是 LiFi。

LiFi 和 VLC 的主要区别是：

(1) VLC 是指“可见光”通信，LiFi 在下行使用 VL，所以 LiFi 的下行是可见光通信；但上行通常是 IR、VL 或 UV，它们是看不见的，所以不属于“可见光通信”，所以，一句话：LiFi 的下行是 VLC，上行不是。

(2) VLC 系统可能是单向传输的，也可能是双向的，而 LiFi 显然必须是双向的，否则我们怎么上传东西呢。

(3) LiFi 提供无缝的用户移动性，而 VLC 并没有说一定要有移动性支持；VLC 系统可能是点对点，也可能是点对多点，或者多点对点，而 LiFi 系统必

须包括多用户通信，也就是说必须是点对多点或者多点对点。

只有当 VLC 系统具有 LiFi 特性（例如，多用户通信、点对多点和多点对点通信以及无缝的用户移动性）时，它才会被视为 LiFi；另一方面，LiFi 系统只有在 VL 作为传输介质时才能被视为 VLC。

一句话，可见光通信 VLC 只是一个宽泛的定义，它仅仅是针对传输媒介来说的，只要是可见光作为传输媒介的，就叫 VLC；而 LiFi 是一种类似 WiFi 的特定网络，它只是用到了 VLC 而已。

从文字形象和实际应用上，LiFi 和 WiFi 都差不多，只是前面一个用的是光，后面一个是 RF。有人担心 WiFi 的辐射会对人造成伤害，LiFi 就不会有这个问题吧。

LiFi 不会像 WiFi 那样，加了密码还担心会不会被别人蹭用甚至信息被邻居截获。LiFi 就不用担心信号会被邻居收到，除非你的光可以照射到邻居家去。所以有人懒得给 LiFi 加接入密码。

当然 LiFi 也有不如 WiFi 的地方，比如，在客厅安的 LED，就很难照射到卫生间去，想在卫生间像 WiFi 那样上网就只有在卫生间安装 LED 灯了，因为，要靠光的到处反射构成非视线（NLOS）通信是很难的，普通物体对光的反射是很弱的，除非到处是反射镜也许还行。

LiFi 与 WiFi 的比较

	WiFi	LiFi
传播媒介	RF 射频电磁波	下行可见光， 上行红外或紫外线
最高数据速率	6Gbps (IEEE 802.11ad)	10Gbps (LED); 100Gbps (LD)
通信距离	100m	10m
干 扰	大	小
方向性	全向	有方向性
标 准	IEEE 802.11	IEEE 802.15.7m

## 相机通信 (OCC)

相机通信，有点奇怪？

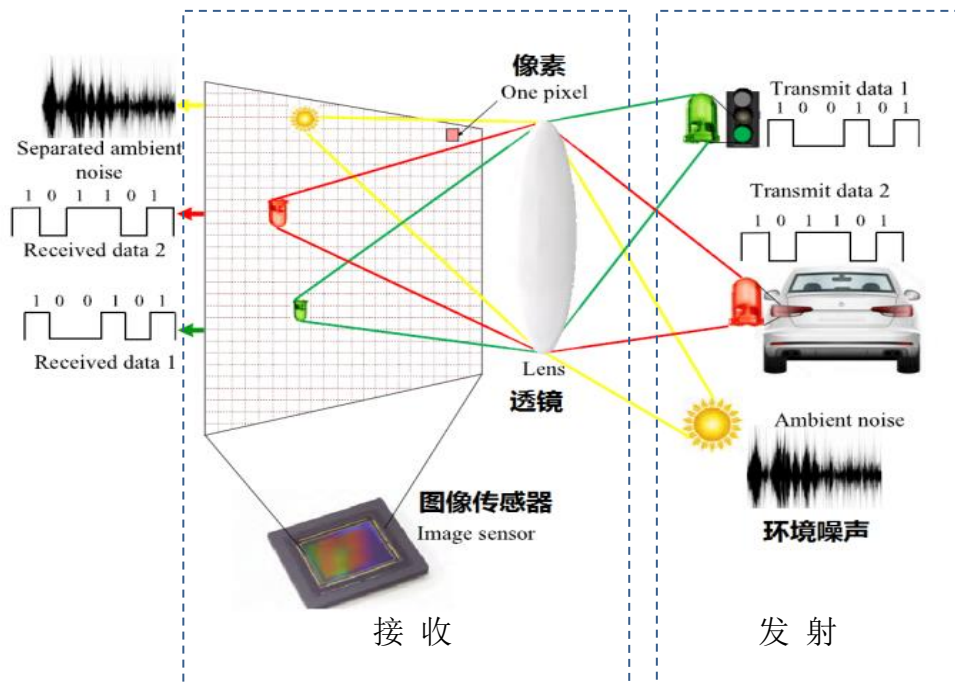
OCC (Optical Camera Communication)，叫光学相机通信，通常就叫相机通信。

### 图像传感器 —— 光信号的“接收天线”

现在的相机好多都不用胶片了，是用图像传感器 (image sensor, IS)，它能把光学图像转换成电信号，所以才有数码照片保存在手机里。显然，这种图像传感器就可以当成光信号的接收“天线”。

图像传感器也就是大家通常说的 CCD 或者 CMOS。当然，严格地说，CCD 和 CMOS 其实是图像传感器根据不同类型元器件的两个分类。CCD 是电荷耦合元件 (Charge Coupled Device)，CMOS 是金属氧化物半导体元件 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)。CMOS 没有 CCD 费电，据说手机大都用的是 CMOS。

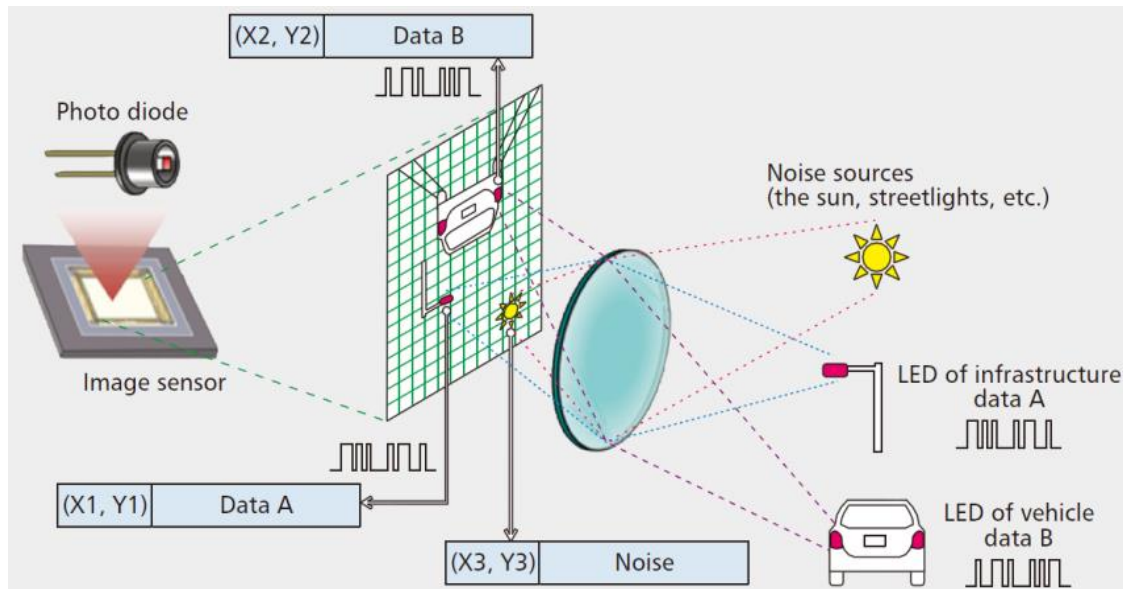
下图是相机通信的原理示意图，来自参考文献[2]。



图像传感器可以轻松捕获、并且区分两个发射源来的信号，其中，一个信号

来自汽车尾部的 LED 阵列，另一个信号来自交通灯。当然，背景噪声也能被分“接收”下来。要注意一下，这里说的“噪声”不是“声”，而是光，对信号光而言，其它的光就相当于“噪声”了。

类似的图在文献[4]中也有：



图像传感器其实是由很多 PD 构成的一个阵列（每个 PD 就是一个像素），所以图像传感器就类似于 RF 无线通信的一个天线阵，而且还是一个 2 维阵。于是，OCC 很方便构成类似 RF 无线通信中的 MIMO 系统，可以实现光通信的空间分集、空间复用。当然，如果要实现空间复用，发端得采用多个光源（如 LED）发送信号。

不过，图像传感器 PD 阵列的“阵元”（像素）可多达 1000 万以上，怎样把空间分辨率这么高的阵列充分利用好，可能不是太容易的事，也许，用“子阵”的办法是一条途径？

## OCC 的问题

OCC 的麻烦是它的通信速率不高，因为常用图像传感器的帧速率为 30 fps，不足以实现高数据速率通信。而且，根据奈奎斯特采样定理，如果用 LED 灯的闪烁来发射信号的话，它的闪烁频率不能高于 15Hz，我们的眼睛受不了啦。



如果假设汽车的行驶速度是 10m/s (36 公里/小时), 走了 10m 才能收到 15bit 的数据, 这个似乎没法接受。所以, OCC 呼唤高帧率 (HFR, High Frame Rate) 图像传感器。实际上, 这不只是 OCC 的事, 对实时 HFR 图像处理的需求还有不少行业, 例如, 机器人, 工厂自动化, 多媒体和生物医学等。毋庸置疑, 用于汽车应用的 VLC 需要 HFR 图像处理技术, 这个问题在文献[4]讨论比较详细。

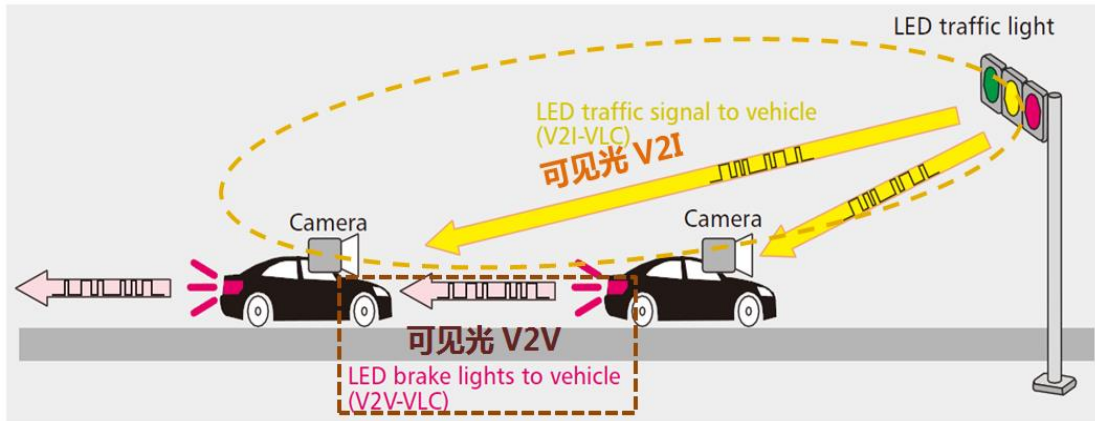
## OCC 可能的应用

虽然现在的硬件还有些不满足需求高的场合, 但别小看了 OCC, 它可能前途无量。

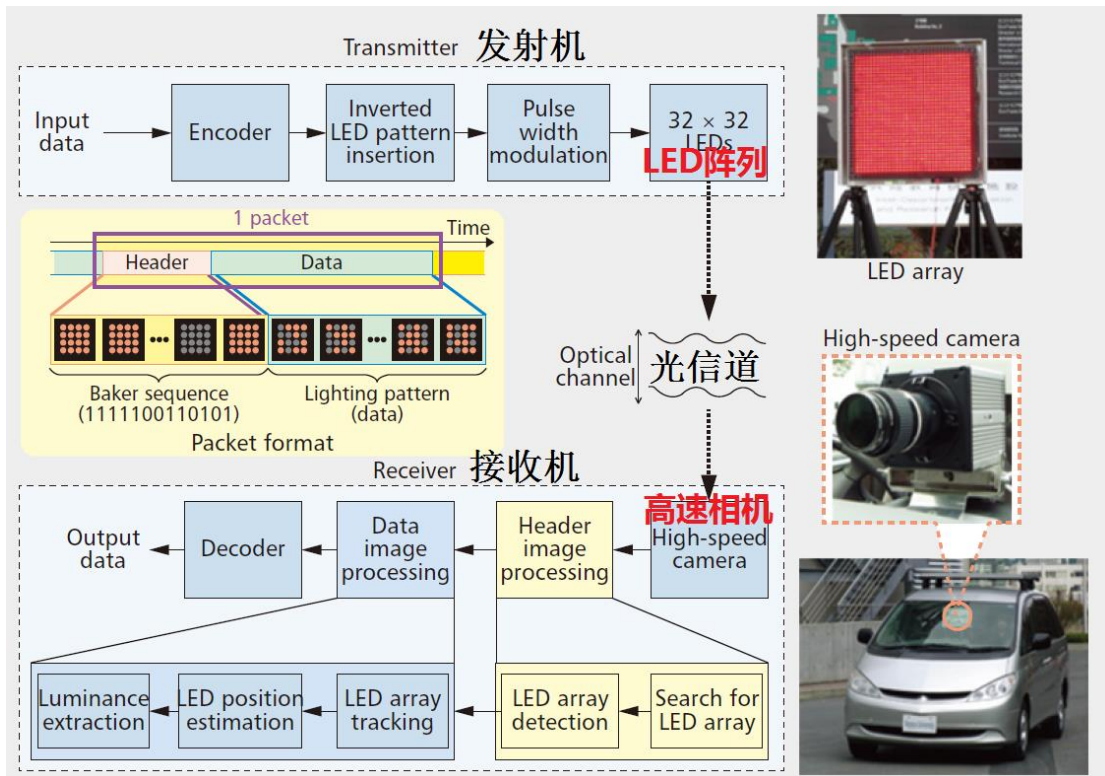
OCC 应用场景, 来自参考文献[2]:



OCC 应用于 V2I 和 V2V，来自参考文献[4]:



V2I-VLC 系统，来自参考文献[4]:



## 自由空间光通信 (FSOC)

Free Space Optical Communication (FSOC)，直译就是“自由空间光通信”，其实主要是指“自由”激光通信，在大气中传输的激光通信。当然，也有的干脆

把FSO和OWC等同起来，例如“Free Space Optical (FSO) communication, also known as Optical Wireless Communication (OWC)” [5]。在文献[5]中，专门对FSO的分类问题进行了研究。不过，我们在这里还是偏向传统的说法，把FSO归入OWC，即指陆地和空间的“自由空间光通信”。

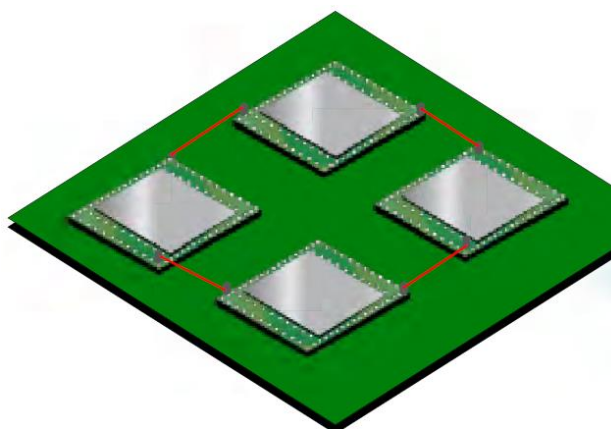
既然是大气中的激光通信，FSO可以提供超远距离（例如超过10000公里）的通信，当然也可近距离通信。无论远近，它的带宽很宽，数据传输率非常高。

在OWC中，FSO应该还是比较早的，自然也就比OOC这些要成熟得多。因此这里也就不再赘述，看看它们的应用吧。

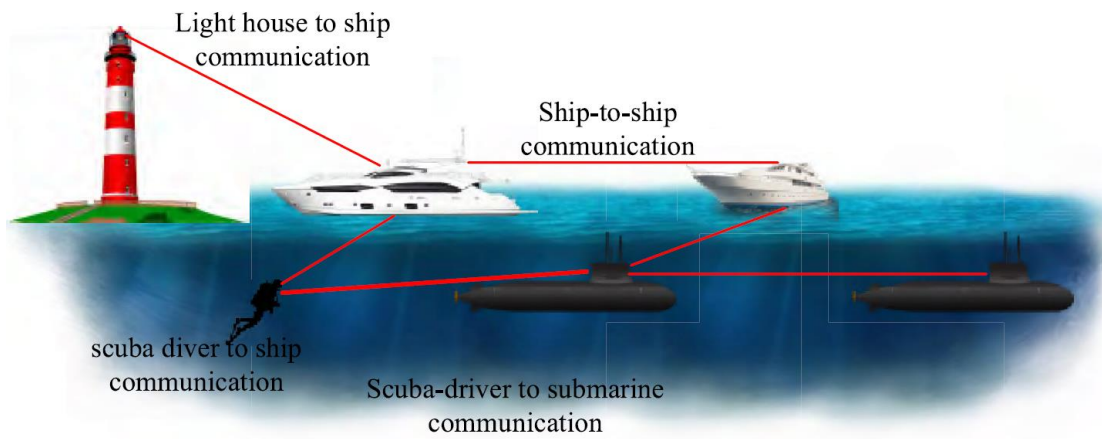
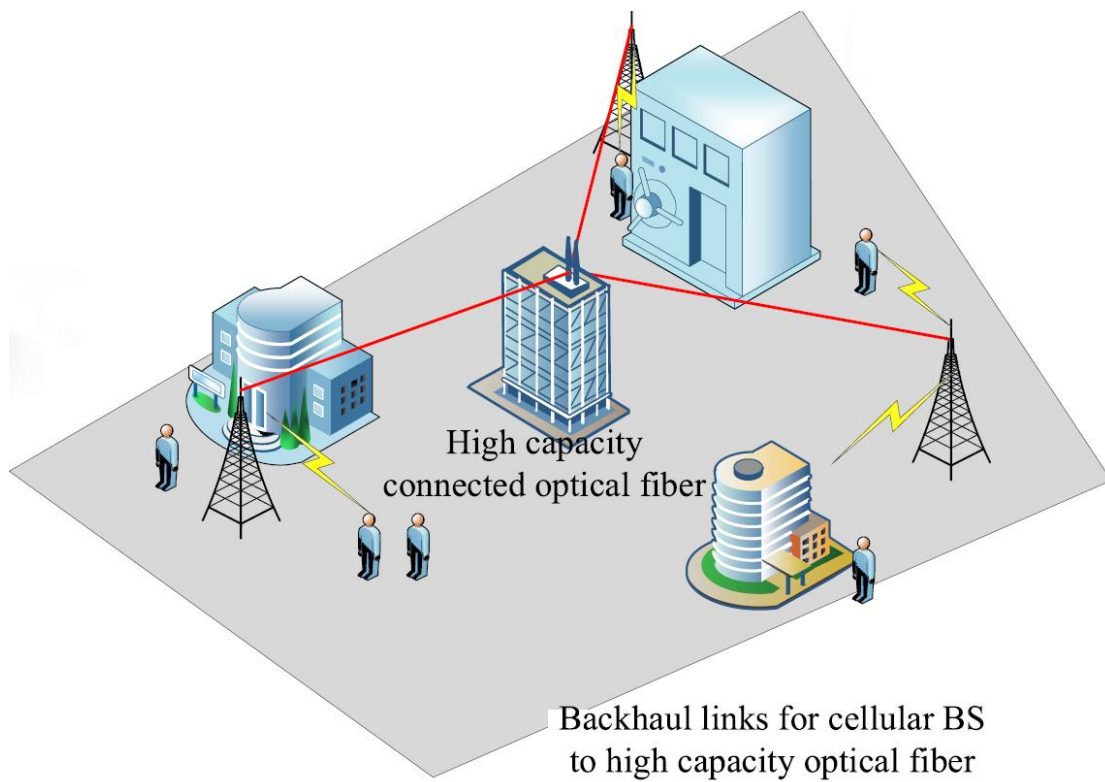
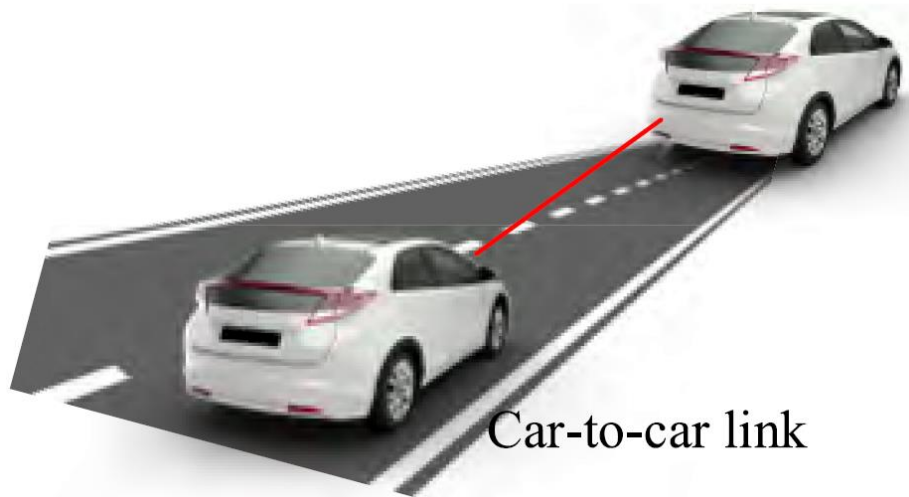
值得注意的是，FSO通信的超远距离可达10,000km，超短距离可以小到芯片间的通信。

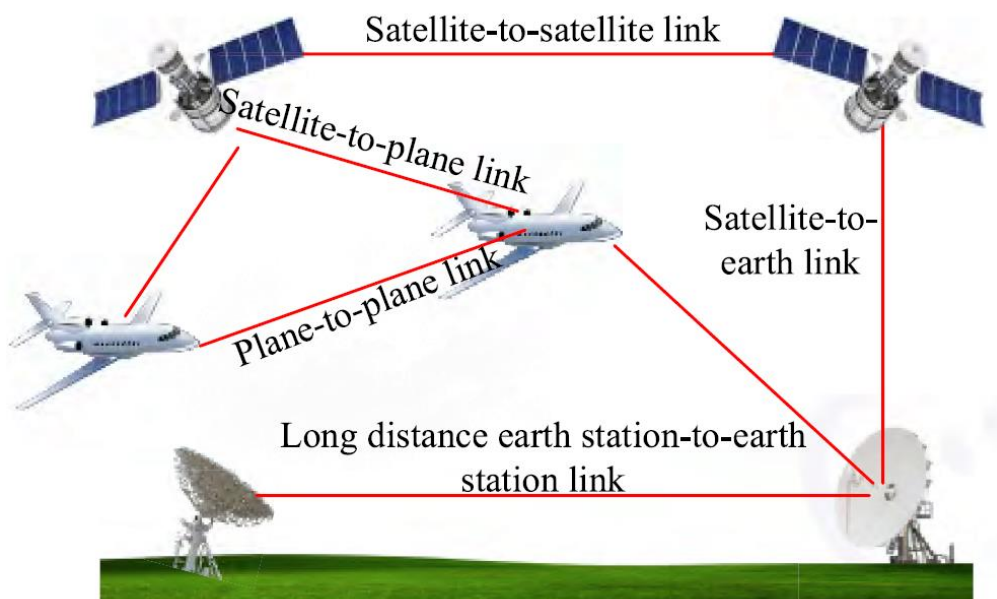


Building-to-building link



Inter-chip link





上面 FSO 应用图示，均来自文献[2]。

最后比较一下 FSO 通信与微波通信，见下表。

FSO 通信与微波通信的比较[2]

	FSO 通信	微波通信
传输媒介	NIR (近红外) VL (可见光) UV (紫外光)	毫米波
最大通信距离	大于 10,000km	大于 100km
数据速率	40Gbps (通信距离 20m) 5.6Gbps (LEO-LEO)	12.5Gbps (5.8m)
干扰	低	高
环境影响	大	小
基础设施成本	较低	高

## 水下光通信 (UOWC)

UOWC: Underwater Optical Wireless Communication, 水下光无线通信。

谁都知道水下通信用声学，干嘛还要用光呢？

## 水声通信——最成熟但不完美

水下声学通信，英文叫“underwater acoustic communication”，就是大家说的水声通信，历史悠久，技术成熟，应用广泛。水声通信最具吸引力的优势是它的通信距离，可达几十公里。在水里的信号要传几十公里并非易事。

首先，由于频率底，带宽就不会宽，所有声学链路的传输数据速率比较低，通常为 kbps 的量级。

其次，由于声波在水中传播速度慢（20 摄氏度纯水约为 1500 米/秒），声链路存在严重的通信延迟，通常长到以秒为单位。

还有，声音收发器通常体积大，成本高，能耗也高，对于那种大规模水下无线传感网络来说，显然不经济。

另外，有意思的是，海洋里面还有些生物就是用声波来“通信”和“导航”的，我们的声学通信，可能会打搅它们呢。

## 水下 RF——频率低又传不远

水下射频（RF）通信就是地面射频通信的延伸，它的优点：首先是“空-水跨界”平稳，就是与声波和光波相比，它在“空-水”接口界面传输比较平稳，这个利于水下水上的顺畅，便于实现地面射频通信系统与水下射频通信系统的跨界通信。其次，射频方法对水湍流和浑浊度的耐受性更强。当然，实际是长波、超长波，通信很稳定，也不受啥干扰。

水下射频方法的缺陷是可使用的频率低，通信距离又不远。海水含有大量盐，射频波只能在超低频（30-300Hz）下传播几米，做得好的话也就 20 米。此外，频率那么低，显然需要很大的天线，发射天线长到以百米计，想想这种天线要放到潜艇下是一个啥感觉？水下 RF 信号的发射是个麻烦事。潜艇要发射远距离 RF 通信，比如短波，就要上浮到把天线伸出水面，赶快把信号发射完，然后又下沉。

## 现在说说 UOWC

与声学 and RF 相比，水下光无线通信 UOWC 的数据传输速率很高，链路延迟不长，成本也低。

UOWC 可以在数十米的中等距离内实现 Gbps 数据速率，当然就可以传输水下视频啦。

由于光在水中的传输速度远高于声波，因此 UOWC 链路延迟就比声链路小到可以忽略不计。

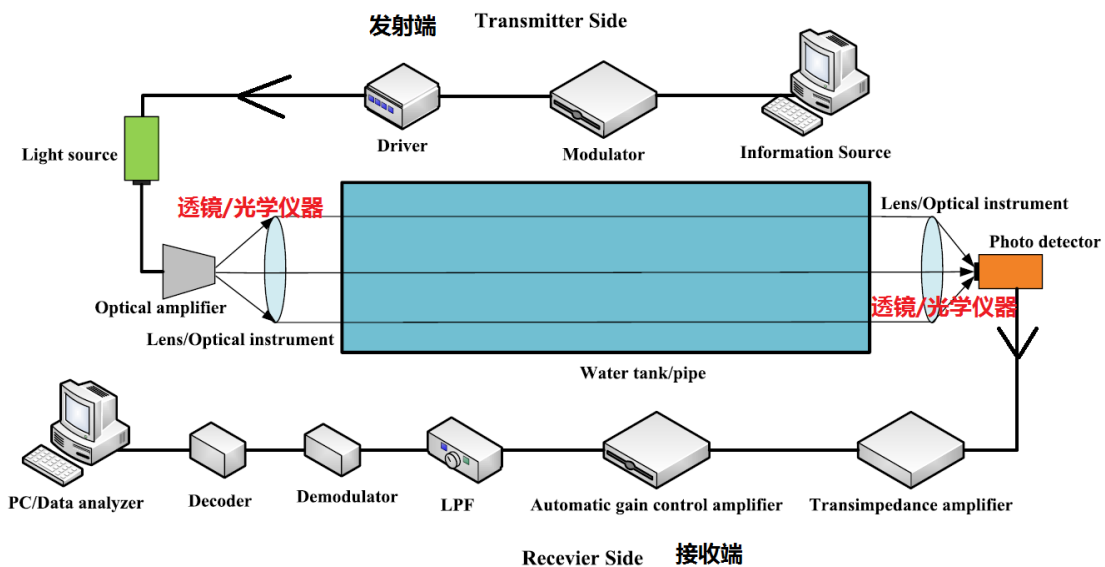
与声学 and 射频方法相比，UOWC 还具有更高的通信安全性。

UOWC 比其声学 and 射频对应产品更节能、更具成本效益。

由于不用大型、昂贵、能耗高的声学 or 射频收发器，而是用激光二极管 and 光电二极管这样的水下光收发器，UOWC 系统的成本低、体积小，有利于大规模商业化，像水下无线传感器网络，很适合用 UOWC。

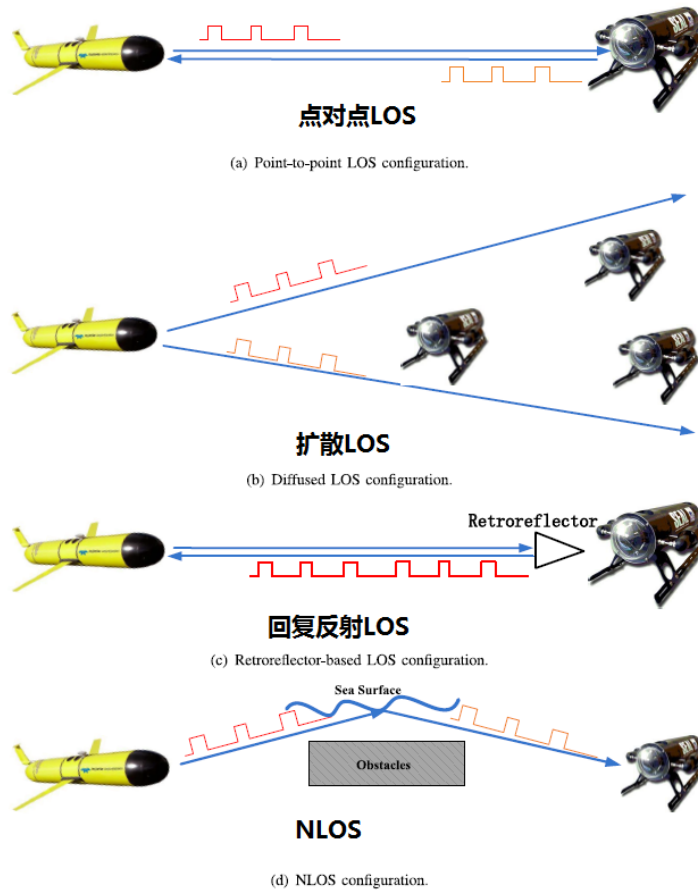
当然，不是说有了 UOWC 就不用声学通信 and 射频通信了，三者其实是共存，各有各的优势，各有各的应用场景。

一种 UOWC 系统的构成，来自参考文献[8]：

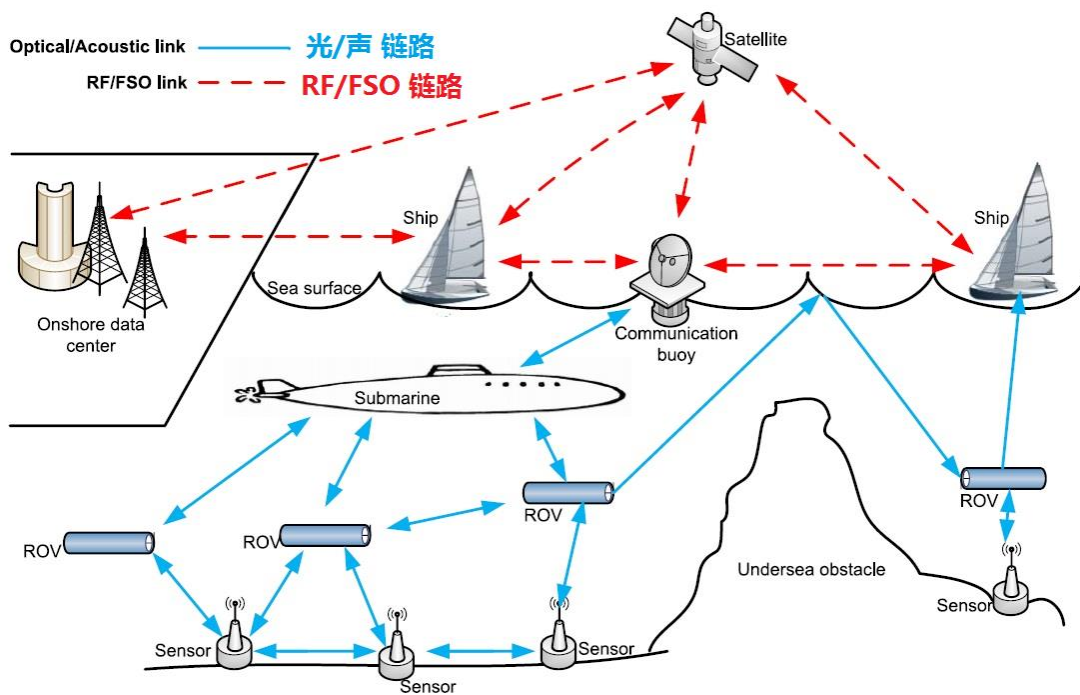


下面看看 UOWC 的信道图示和场景。

UOWC 的 4 种信道，来自文献[8]：



与陆地和空中连接的水下无线传感器网络，来自文献[8]:






## RFC+OWC，从 5G 到 6G?

### 无线通信，Where to go?

很多人都说，光无线通信 OWC 支持高速数据传输，适合物联网大规模连接，是很有前途的技术。5G 及 5G 后的通信，必然具备超密集异构网络的必要功能，而 VLC，LiFi 和 OCC 可以提供超密集的小小区热点服务。此外，FSO，LiFi 和 VLC 可以有效地为 5G 及 5G 后的通信系统提供高容量回程支持。

无论怎样，有一点是肯定的，那就是，那些还没有被通信利用的“光谱”，一定会被利用起来。频谱非再生，放着那么宽的光波段不用，非要都挤在 RF?

所以，未来必然是 RFC+OWC，也就是“无线电+无线光”，这是满足需求日益增长的必由之路。



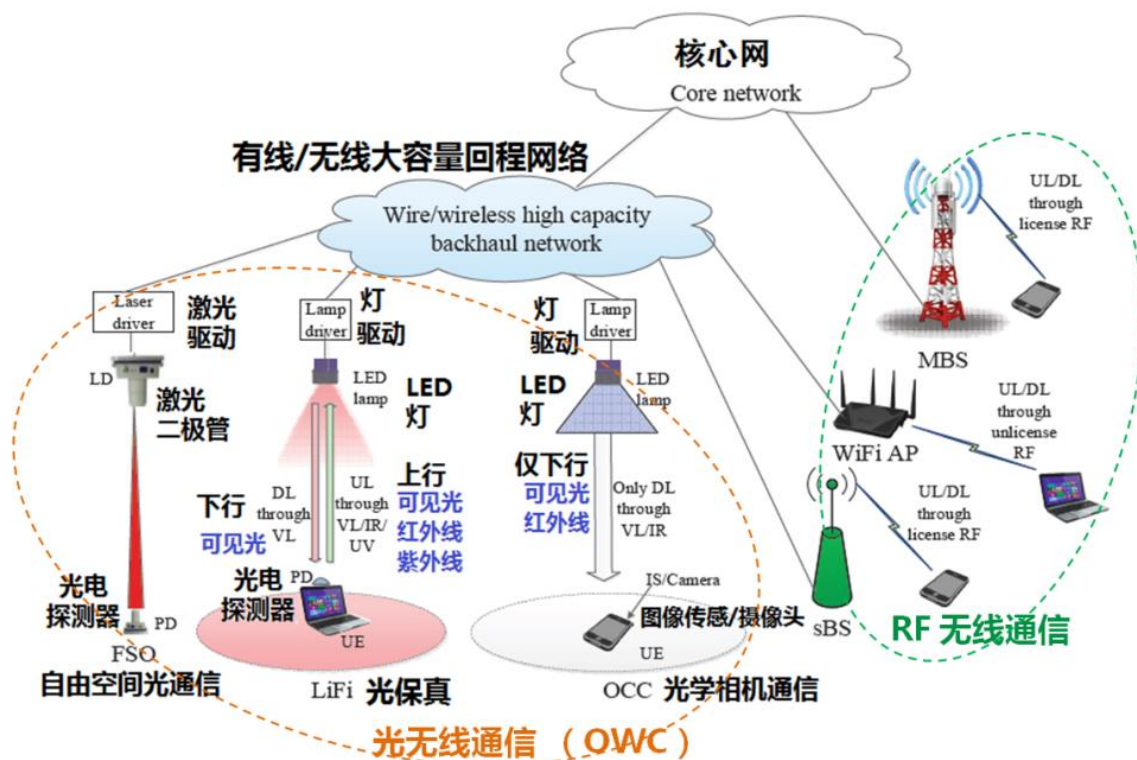
RF这么挤，那些闲着的“光谱”为啥不用呢

## “全景”无线通信

“无线电通信+无线光通信”，构成了无线通信的“全景”。

各自都有各自的优势，也有各种的缺陷，多种需求，多种应用，“互补”就是自然的了。

这样的“全景”可以用文献[1]的一个图来示意，我们把图中的 OWC 部分翻译成了中文，RF 无线通信部分就不必说了：



无线通信的“全景”，涵盖了包括太赫兹频段在内的 RF 频谱，以及包括红外线、可见光和紫外线的光谱。它们的简要归纳见下表：

## 无线电通信和无线光通信

关注问题	无线光通信 (OWC)				无线电通信 (RFC)
	LiFi	VLC	OCC	FSO	
标准	进行中, 原 IEEE802.15.7m TG, 现改为 IEEE 802.15.11 LC SG	成熟, IEEE 802.15.7-2011	进行中, IEEE 802.15.7m TG	完善	成熟
发射	LED/LD(LD 与光学漫射器结合)	LED/LD	LED	LD	天线
接收	PD	PD/相机	相机	PD	天线
调制	OOK, PM(Pulse Modulation), OFDM, CDMA, CSK (Color Shift Modulation), 等。	OOK, PM, CDMA, OFDM, CSK, 等	OOK, PM, CDMA, OFDM, CSK, 等。	OOK, PM, OFDM, 等	ASK, PSK, PM, OOK, CDMA, OFDM, 等。
OFDM	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
MIMO	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
距离	10m	20m	200m	>10000km	>100km
干扰	小	小	零	小	很大
噪声	阳光, 环境光源	阳光, 环境光源	阳光, 环境光源	阳光, 环境光源	所有电气、电子应用
环境影响	室内: No; 室外: Yes	室内: No 室外: Yes	NO	Yes	Yes
数据速率	10Gbps (LED), 100GPS (LD)	10Gbps (LED), 100Gbps (LD)	54Mbps	40Gbps	6Gbps (IEEE 802.11ad, 60G Hz 频段)
安全性	高	高	高	高	低
频谱	IR, VL, UV	VL	IR, VL	IR, VL, UV	无线电波
频谱管制	No	No	No	No	Yes (有例外)
路径损失	中, 很大 (NLOS)	中, 很大 (NLOS)	较小	大	大
照明	Yes	Yes (LED 时)	No	No	No
主要目的	照明, 通信	通信, 照明, 定位	通信, 成像, 定位	通信	通信, 定位
主要限制	距离近, 不适合室外	距离近; 不保证移动性; 不适合室外	速率低	取决于环境	干扰

# OWC 之未来研发

## 异构混合网络

把两种或两种以上的不同通信技术集合运用，构成如 OWC/RF、FSO/RF、WiFi/LiFi、VLC/Femtocell、VLC/FSO 和 LiFi/OCC 等等这样的网络。

混合网络可以在负载平衡、链路可靠性、远程可连接（如深空、深海）和减少干扰方面发挥重要作用。

这种异构混合网络的麻烦事，就是“切换”问题，如何自适应地、平稳地从一个系统切换到另一个系统，是一个不小的挑战。在 OWC 中的水平切换，例如在 LiFi 网络之间的切换；更重要的，垂直切换，例如，在 LiFi 和 WiFi 网络之间的切换；这些还待逐步研究。

## 光回程

对于 5G、B5G/6G，大容量回程连接非常重要，光无线网络，如 FSO 或 VLC，是一个有前途的研究课题。

## NLOS 紫外光通信

UV 波段的一个重要特征，就是可以实现 NLOS 条件下的高速率传输，这是 UV 的一个重要优势，但如何发挥好这个优势，还有很多问题值得研究。

## 小区间的光干扰

不同小区之间的 LED，如果有重叠照射区域，就会产生干扰问题。对于 VLC/LiFi 小小区，密集部署 LED，干扰管理不得不解决。

## 水下光通信

水下通信的距离问题和数据传输速率问题是两个老大难问题。405nm 蓝光激光器的应用有望成为远程水下通信的一个重要研究课题。当然，设计适合水下环境特点的调制和编码技术，也还是一个重要的研究方向。

## 无缝移动性

很多时候,OWC 系统也需要支持用户移动,但目前只有 LiFi 提供无缝连接。与无线电相比,无线光的无缝移动性更麻烦。

## MIMO 光无线通信

虽然 MIMO 在 RF 的通信系统中已经比较成熟,但在 OWC 中应用 MIMO 还具有挑战性。MIMO OWC 意味着 LED 阵列、PD 阵列、LD 阵列,等,由于 MIMO 带来的复杂性和无线光信道的特殊性,充满了挑战。

## OCC 的速率

OCC 系统的数据传输速率不高,目前只能达到几十 Mbps,这显然不能满足高速数据的需求。基于红、绿和蓝色 (RGB) LED 的 OCC,使用 RGB LED 发射,彩色相机 (图像传感) 接收,可以实现并行可见光通信通信,很诱人,不少研究人员正在进行这种研究。

## 调光控制

设计调光算法,有效部署 OWC 系统。

## 避免人感觉闪烁

光信号调制,不应该引起人们感觉到闪烁。而在低速率的类似 OOK 这样的系统,容易导致这种情况。避免让人感到光的闪烁,是部署 OWC 系统必须要考虑的一个问题。

## 参考文献

- [1] Mostafa Zaman Chowdhury, et al., Optical Wireless Hybrid Networks for 5G and Beyond Communications, ICTC 2018
- [2] Mostafa Zaman Chowdhury, et al., Comparative Survey of Optical Wireless

- Technologies: Architectures and Applications, IEEE Access, Volume 6, 2018
- [3] Toshihiko Komine, et al., Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 50, No. 1, February 2004
- [4] Takaya Yamazato, et al., Image-Sensor-Based Visible Light Communication for Automotive Applications, IEEE Communications Magazine, July 2014
- [5] Abdelbaset S. Hamza, et al., Classification Framework for Free Space Optical Communication Links and Systems, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018 (Early Access)
- [6] Hemani Kaushal, et al., Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19, No. 1, First Quarter 2017
- [7] Ahmed Al-Kinani, et al., Optical Wireless Communication Channel Measurements and Models, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 20, No. 3, Third Quarter 2018
- [8] Zhaoquan Zeng, et al., A Survey of Underwater Optical Wireless Communications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19, No. 1, First Quarter 2017



临菲信息技术港



临菲信息技术港公众号



临菲学堂