

# 微波光子学研究进展

## Advances in Microwave Photonics

谢 世 钟

清 华 大 学 电 子 工 程 系

*Dept. of Electronic Engineering Tsinghua University*

Tel: 62788161

Email: [xsz-dee@tsinghua.edu.cn](mailto:xsz-dee@tsinghua.edu.cn)



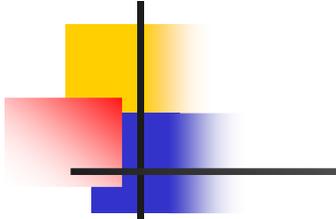
# 微波光子学(Microwave Photonics)

- 从20世纪70年代以来，光电子学和光纤通信技术的迅速崛起和微波技术的发展，使得原本各自独立的两门学科越来越紧密结合起来。
- 光纤通信系统的低损耗、高带宽特性对于微波信号的传输和处理来说充满了吸引力；而大容量光纤通信系统的发展也使得在光发射机和接收机中必须采用微波技术。
- 微波通信
  - ☺ 能够在任意方向上发射、易于构建和重构，而且能实现与移动和手提设备的互联；
  - ☺ 传输成本低（通过大气传输）；
  - ☺ 采用蜂窝式系统具备高效的频率利用率；
  - ☹ 微波传输介质在长距离传输时具有很大的损耗，使向高频扩展受限；
  - ☹ 电磁辐射对人体安全的影响
- 光纤通信。
  - ☺ 体积小、重量轻、损耗低；抗电磁干扰；
  - ☺ 超宽带（> 50THz），目前已实现单路 40 – 160Gb/s 的信号传输；
  - ☺ 易于在波长、空间、偏振上复用，目前已实现单根光纤 10Tb/s 的信号传输；
  - ☹ 移动性不够

# 微波光子学(Microwave Photonics)

**Microwave photonics is a multi-disciplinary research area which studies the interaction of microwave and optical signals for applications such as microwave/millimeter-wave signal generation, distribution, control and processing by means of photonics.**

- 两者在电磁波动理论基础上统一,并可用相同工艺和材料在同一芯片上集成大大促进了交叉学科微波光子学的形成和发展。
- 目前已可采用**GaAs**、**InP**等材料,用相同的工艺将激光器、光探测器、调制器和微波**FET**集成在同一芯片上,制成光微波单片集成电路(**OMMIC**),今后的发展趋势是两者将密不可分地融合为光电统一体。
- 作为该学科孕育成长的标志, **1994**年以来,开始有关于微波光子学的学术会议及学术刊物专辑 (**IEEE**、**OSA**、**SPIE**等)。



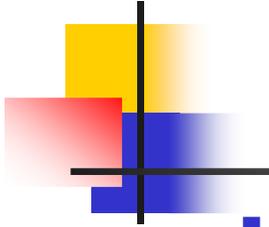
# 微波光子学(Microwave Photonics)

- 微波光子学是微波和光子学融合的新兴学科领域，研究微波和光子的相互作用及其应用：

**光对微波的作用：**使用光电器件和系统处理微波系统中的信号，包括光对微波信号的产生、放大与交换的调控作用（光对微波半导体器件有源层中载流子浓度和运动的激发与控制）

**微波对光的作用：**研究微波速率的光电器件和系统应用以及微波对光的传输、折射偏振及信号传递的调控作用（导光媒质的极化与载流子分布受微波场变化而导致光导率、折射与偏振特性的改变）

- 作为研究微波或毫米波波段的高速光子器件及其在微波/光波系统中的应用的一门新兴学科，微波光子学在器件和系统方面都有众多的研究方向。



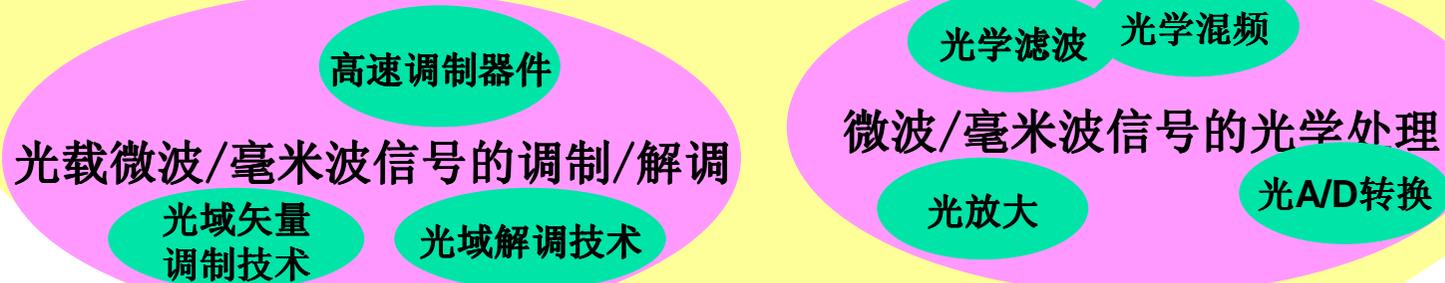
# 微波光子学的研究与应用领域

- 材料和器件
  - 微波光子材料和器件工艺；
  - 超短光脉冲技术和超快光电子器件；
  - 高速宽带光电子/光子器件：包括激光器、调制器、放大器、探测器等；
  - 微波光子系统的建模和设计；
- 微波和光波相互作用
  - 光控微波器件和电路（例如延时、谱分析、频率转换、信号综合、滤波、信道选择、数据转换等）；
  - 光致电信号合成和控制（从GHz微波到THz波）；
  - 高速光调制和检波；
  - 光和微波信号的混频；
- 微波信号的光传输
  - 副载波复用和CATV传输；
  - 光馈信号的蜂窝式无线系统/网络；
  - 千兆比特电路的芯片-芯片光互连；
- 微波光子学的系统应用
  - 基于不同调制格式的光纤通信系统；
  - 光控相控阵天线；
  - 卫星光通信系统；
  - 太赫兹波系统；
  - 测量技术；

# 微波光子学的研究与应用领域



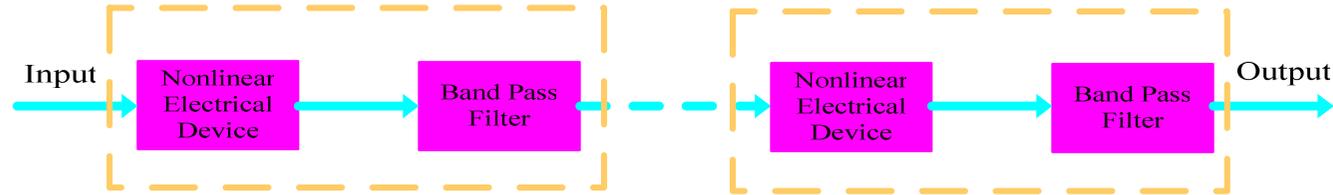
## ROF系统中微波光子学的研究内容



# 微波信号的光子学产生方法

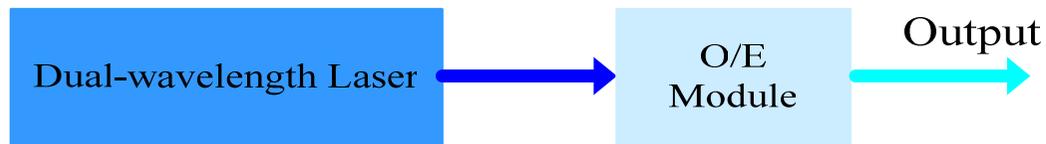
微波源：宽带可调、低相噪、窄线宽、成本低、稳定性好

方法一



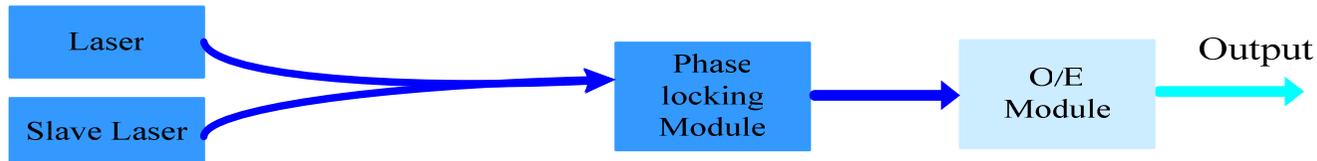
优点：工艺成熟，易于集成，成本低 缺点：电子瓶颈

方法二



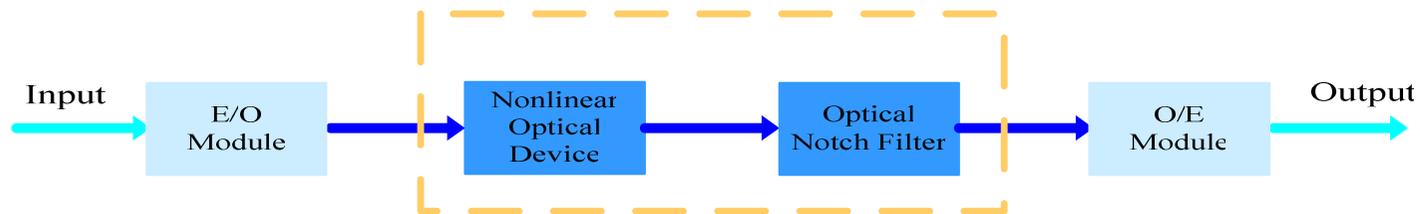
优点：频率可达THz 缺点：不稳定，线宽宽~几十kHz

方法三



优点：频率可调谐 缺点：相位噪声、复杂、不稳定

方法四

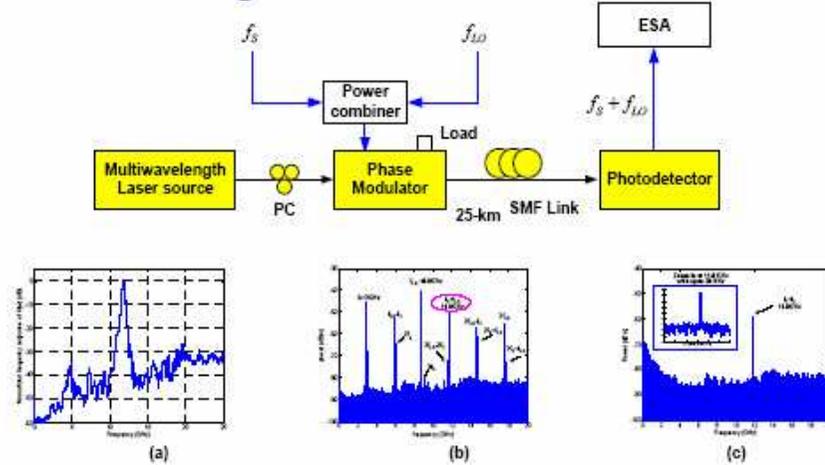


优点：低相位噪声、窄线宽、结构简单、稳定性好

# 光子学微波滤波器

OFCNFOECI

## All-optical microwave mixing and bandpass filtering in a radio-over-fiber link

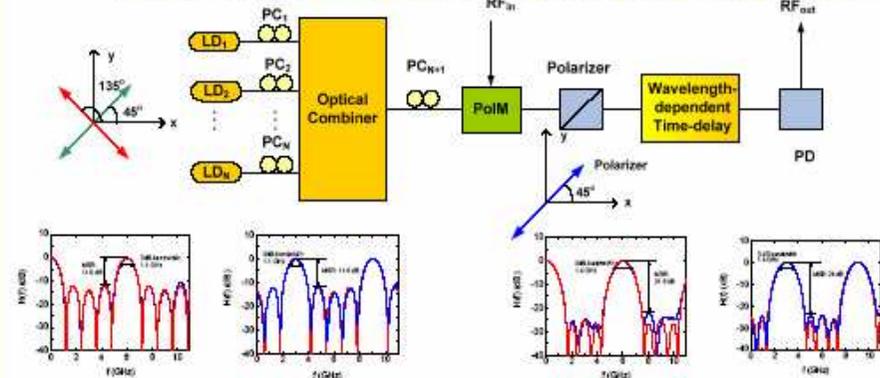


(a) Filter frequency response, (b) mixing output without filtering, (c) mixing output with filtering.

F. Zeng and J. P. Yao, "All-optical microwave mixing and bandpass filtering in a radio-over-fiber link," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 17, no 4, April 2005

OFCNFOECI

## Multi-tap photonic microwave filters with arbitrary positive and negative coefficients using a polarization modulator and an optical polarizer

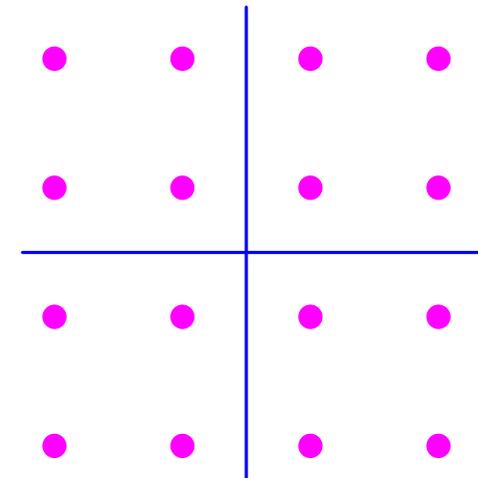
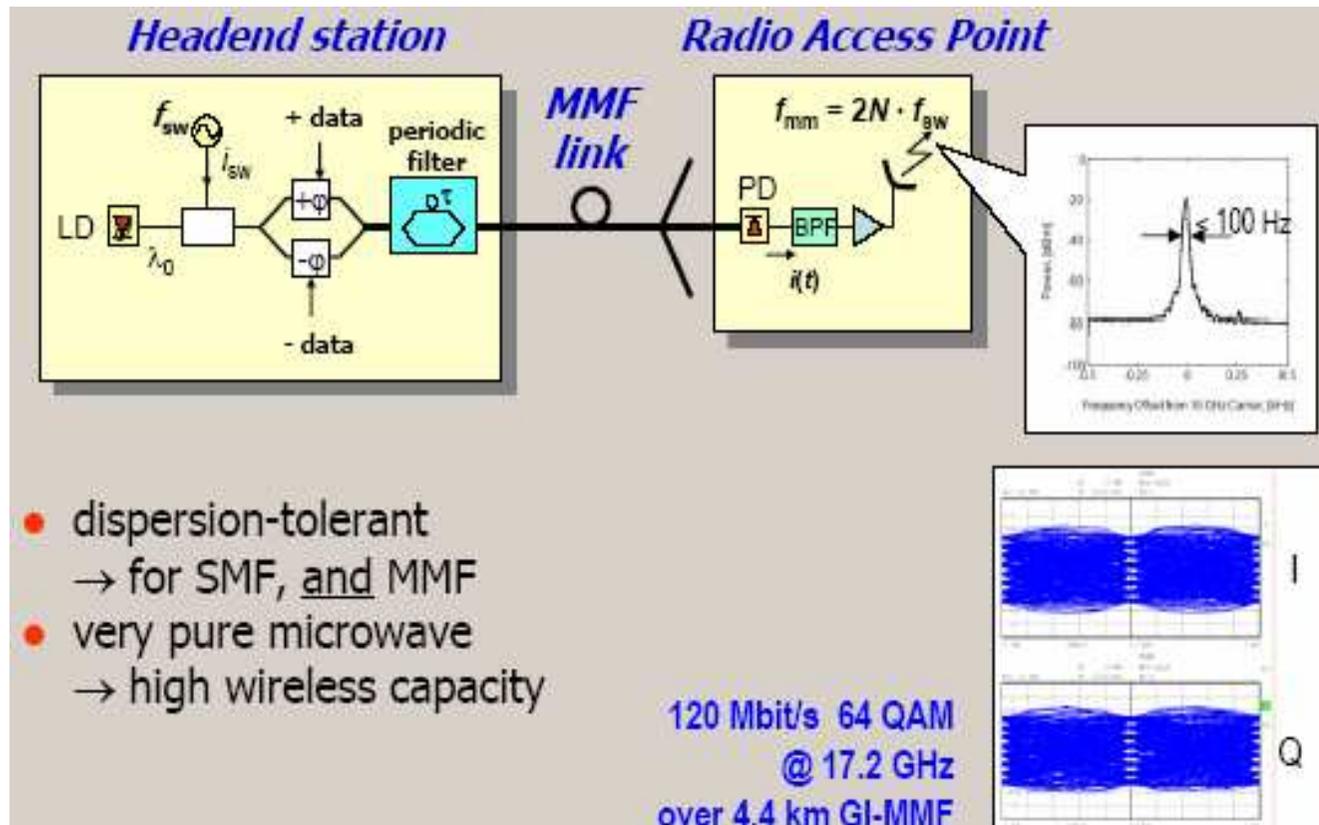


The experimental (solid line) and simulated (dashed line) frequency responses of the five-tap photonic microwave bandpass filter with even coefficients; (a) coefficients (1, 1, 1, 1, 1); (b) coefficients (1, -1, 1, -1, 1).

The experimental (solid line) and simulated (dashed line) frequency responses of the five-tap photonic microwave bandpass filter with windowing; (a) coefficients (0.37, 0.78, 1, 0.78, 0.37); (b) coefficients (0.37, -0.78, 1, -0.78, 0.37).

Q. Wang and J. P. Yao, "Multi-tap photonic microwave filters with arbitrary positive and negative coefficients using a polarization modulator and an optical polarizer," IEEE Photonics Technology Letters, accepted

# RoF by Optical Frequency Multiplying



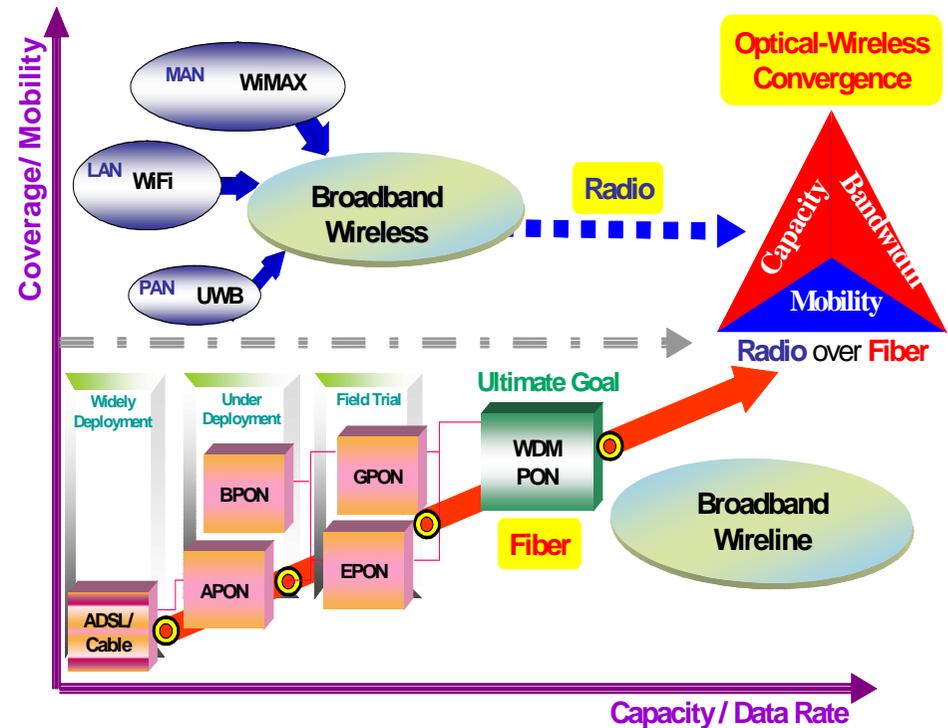
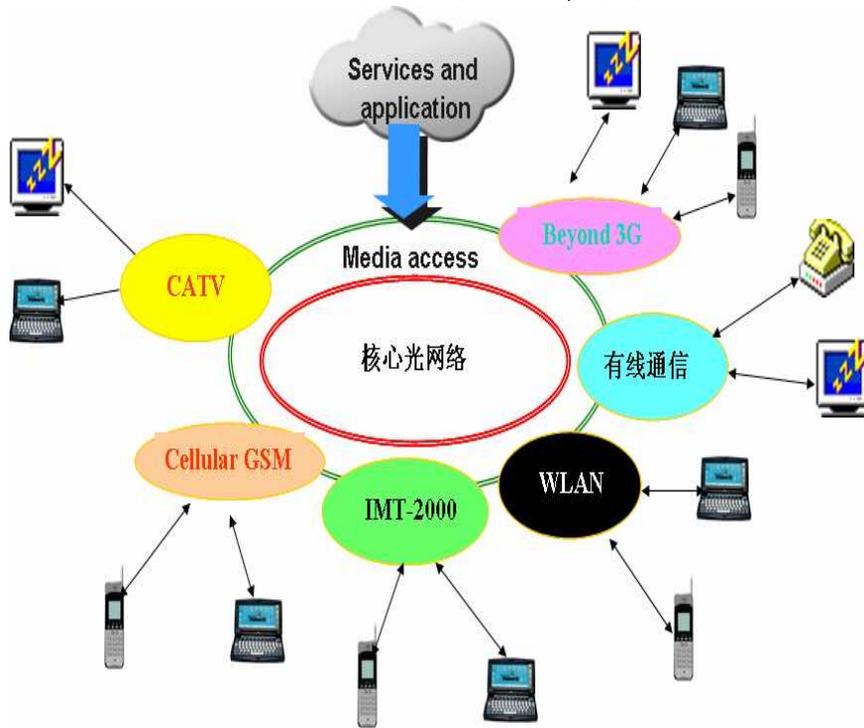
16QAM星座图

## 微波/毫米波16QAM调制

# 无线(微波)技术与光子技术的结合

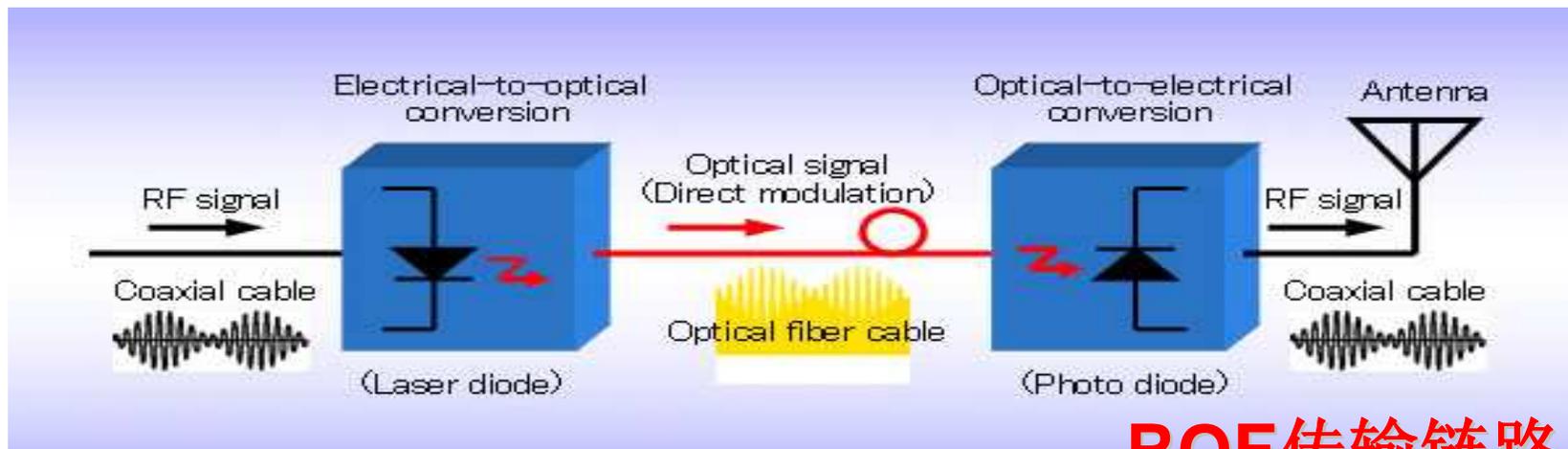
## ■ 在接入网, 无线有着强大的生命力

- 移动通信网: 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> G, .....4G
- WLAN,WIFI, 固定无线接入.....
- 随着技术的发展, 无线网络技术(与GSM相比)越来越复杂, 带宽要求也越来越高



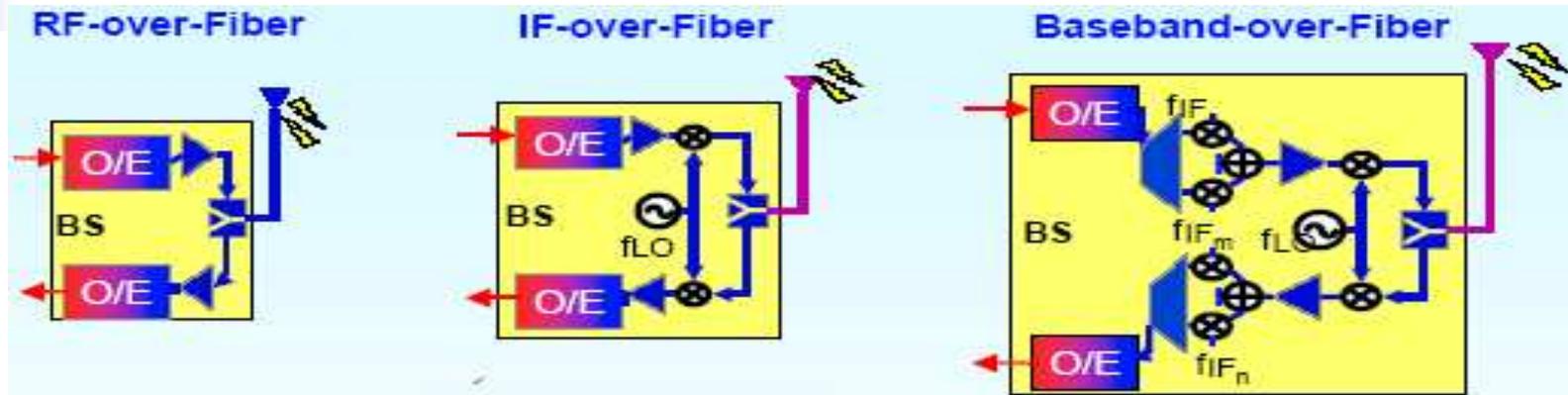
# 光纤无线 (ROF)技术

- **ROF**技术是将RF载波调制到光波、并在光纤网络中进行传输的技术,它用于实现中心局与各个微蜂窝的天线之间信号传送和分配. 它的优点在于可以将复杂的微波处理单元放置于中心局,而基站部分仅只有光电转换单元和微波放大单元两部分,将光纤所传送的无线载波信号直接发送到天线. 因此它又被称为**FTTA(Fiber to the Air, 或 Fiber to the Antenna)**技术. 这种优点将随着蜂窝范围的缩小而进一步显现.



**ROF传输链路**

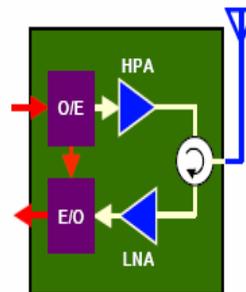
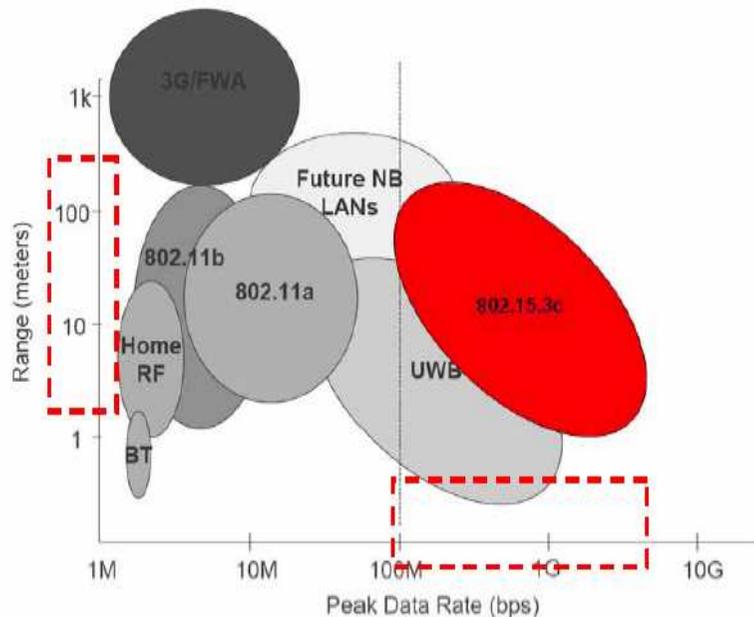
# 三种基站结构的比较



- **RF-over-fiber:** 基站简单，功耗较小。这是由于用于建设基站的器件数比较少。可以利用现有成熟的混合集成电路（HIC）技术，同时降低成本，适合广大普通用户使用。但受光纤色散影响较大。这严重限制了信号的传输距离。不过，它可以通过使用一个单边带载波调制（OSSB+C）方案来减小色散的影响。而且，它需要**高速的调制技术和探测技术**。
- **IF-over-fiber:** 受光纤色散影响较小。但需要额外的电子硬件（如：毫米波本地振荡源LO）来实现向上或向下的频率变换（up-conversion /down-conversion）。这会限制无线网络的重构和升级。这个可以采用远端供给LO信号的方式，来缓解基站建设的复杂性。
- **Baseband-over-fiber:** 可以利用现有成熟的射频和数字硬件。但随着所传输的信号频率的增大，基站频率转换的需求会使得它的**结构变得很复杂**。而且，基站附加的本地振荡、昂贵的信号处理硬件（频率转换、多用户的复用和解复用）也许会限制该系统的容量的升级。

# 60 GHz in data comm: IEEE802.15.3c

- ✓ Frequency allocation in 25~100 GHz for data communication
- ✓ License free or unlicensed use of mmW band in Japan, US, and Korea (59 GHz to 64 GHz)
- ✓ Data rate of 2 Gbps or more for HD video signal



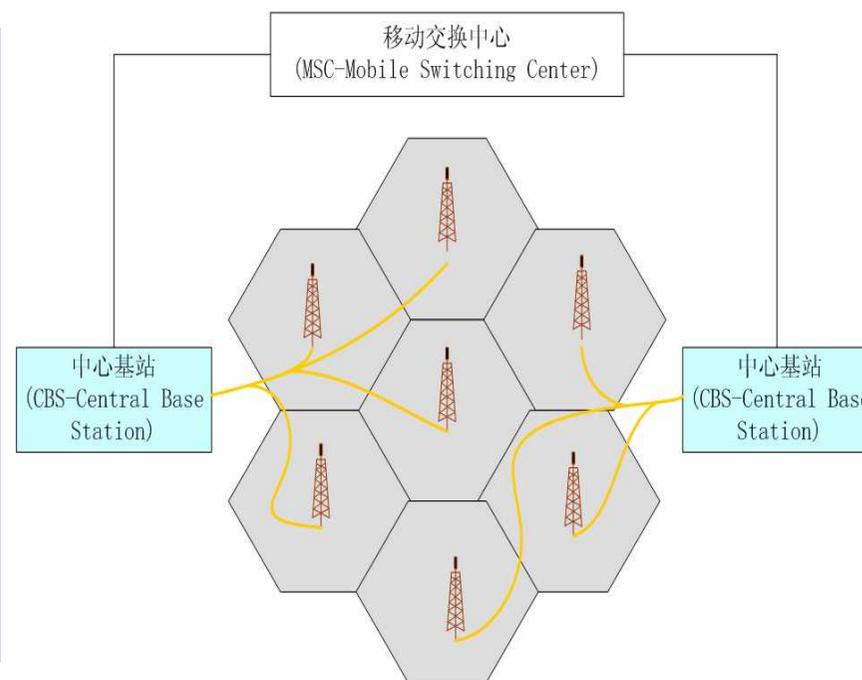
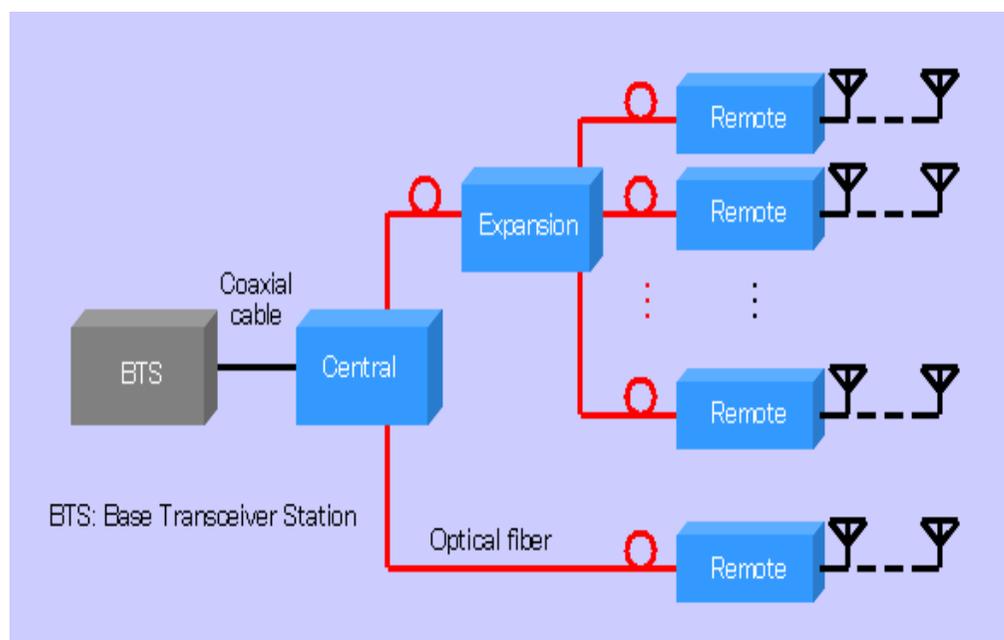
- ✓ Low cost
- ✓ Small and simple
- ✓ NO frequency conversion
- ✓ Low power consumption
- ✓ Centralized channel frequency management
- ✓ CO equipment sharing among users

## Issues:

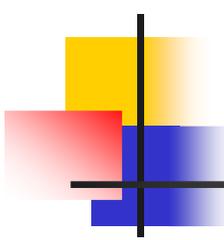
- ▶ High-speed devices for optical & electrical
- ▶ Small foot print by integration
- ▶ System-on-packaging (SOP), LTCC
- ▶ Interface with 60G modem/MAC
- ▶ RF/optic conversion (link gain, SFDR, NF)

# ROF系统解决无线接入问题的优点

随着蜂窝的范围越变越小, 对应基站数目大大增加, 中心局到基站之间的通信也大大增加



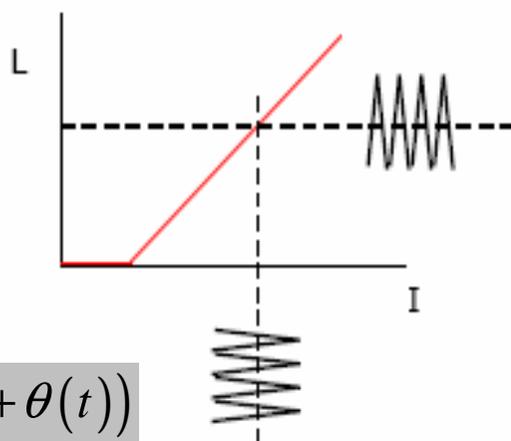
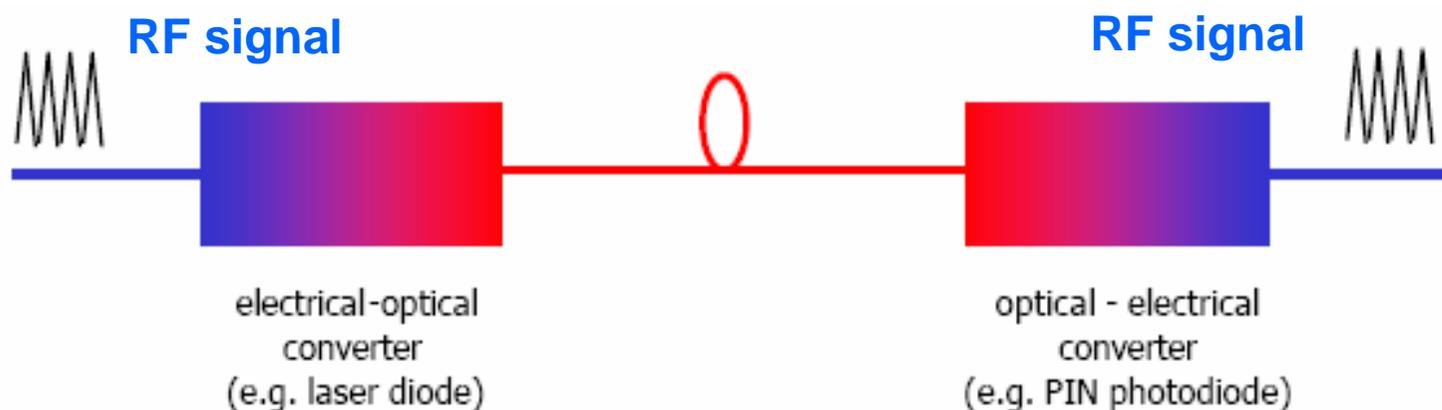
**光纤比铜缆将更有竞争力!**



# ROF系统解决无线接入问题的优点

- 蜂窝半径可很小，频率复用率提高
- 辐射功率低，可省去大功率放大器，降低基站成本
- 简化基站: 将RF信号处理的复杂单元移到中心局;
- 升级网络时,只需升级中心局,而不需要升级简单的基站
- 由于采用光纤技术,可利用光纤城域网络或点亮已铺设的暗光纤。利用已成熟的WDM技术与CWDM技术。
- 利用成熟的光子技术,比如可重构的光分插复用器件等,可实现动态的、灵活的和可重构的无线信号分配。
- 由于光纤传输链路对频率、调制格式的透明性,频率或调制格式的变化不引起基站设备的更换, 可实现多制式、多频带、多运营商的无线信号的传输与分配。

# Analog Optical Fiber System



$$V_{pp}(t) \cos(\omega_{RF}t + \theta(t))$$

Current or voltage

- Digital modulation of radio carrier
  - FSK, PSK, QAM, ...
- Radio carrier is analogue waveform
- Optical transmission of radio signals is therefore analogue
- Normally direct (intensity) modulation
- Direct detection → IMDD

# ROF的研究进展

■ 在2005年的微波光子学会议上报道的工作频率最高的ROF系统是日本一个研究小组的成果。他们的这套ROF系统的采用主动锁模激光器MLLD、电致吸收调制器EAM、单行载流子光电管 UTC-PD，成功的实现了10Gb/s的信号在125GHz的ROF系统上的传输。是目前所见的最高水平报道。

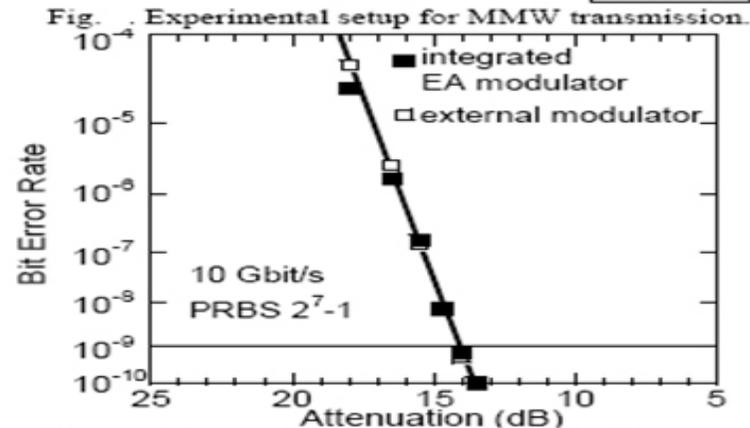
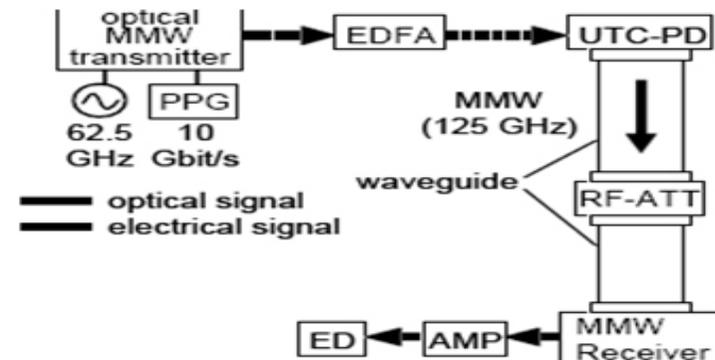
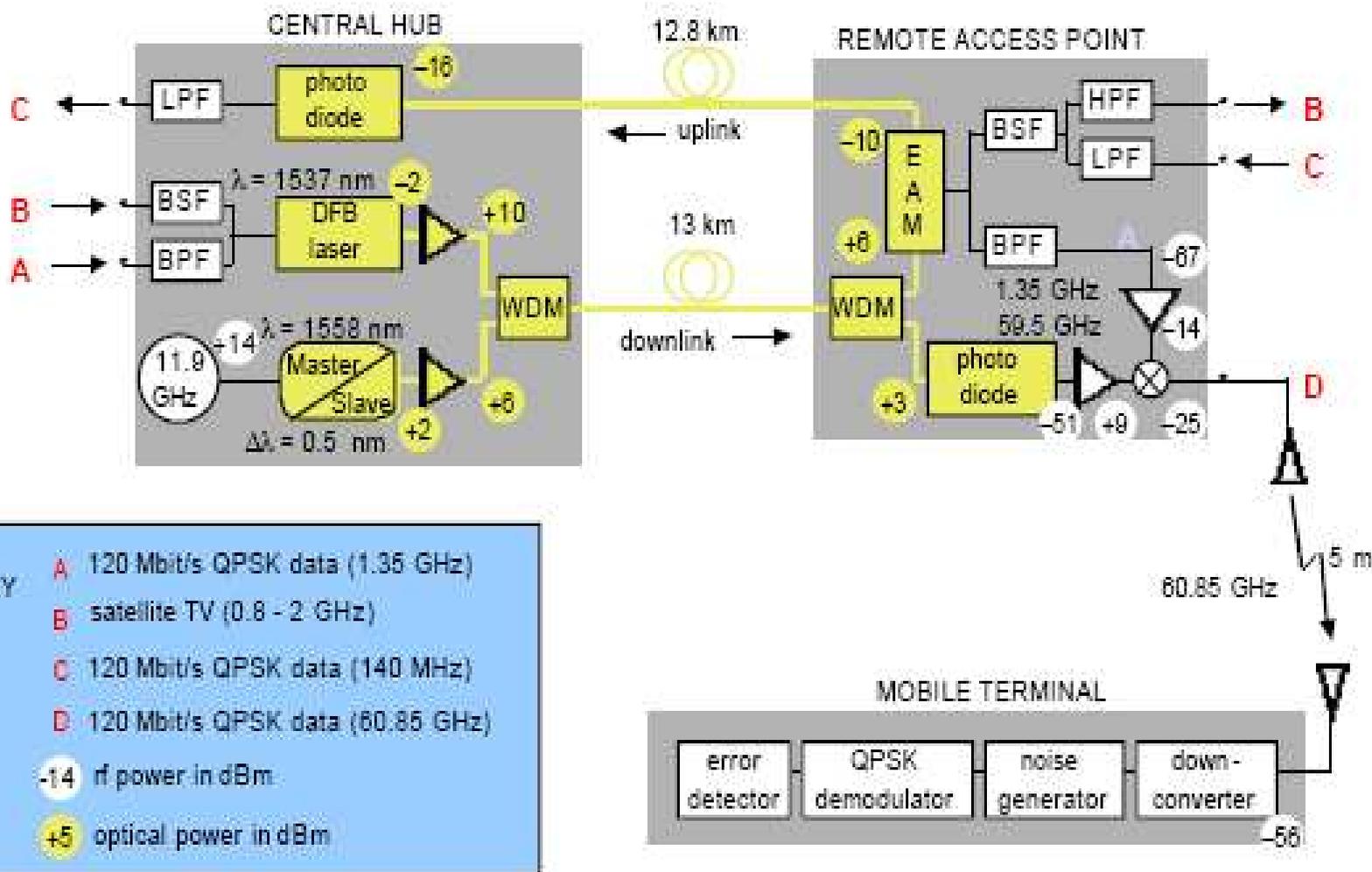
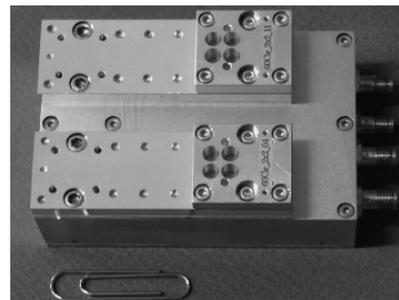
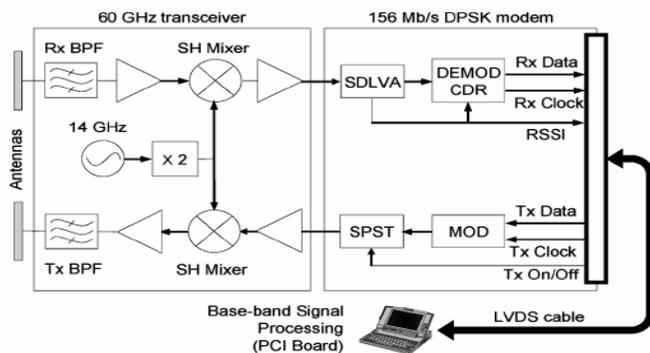
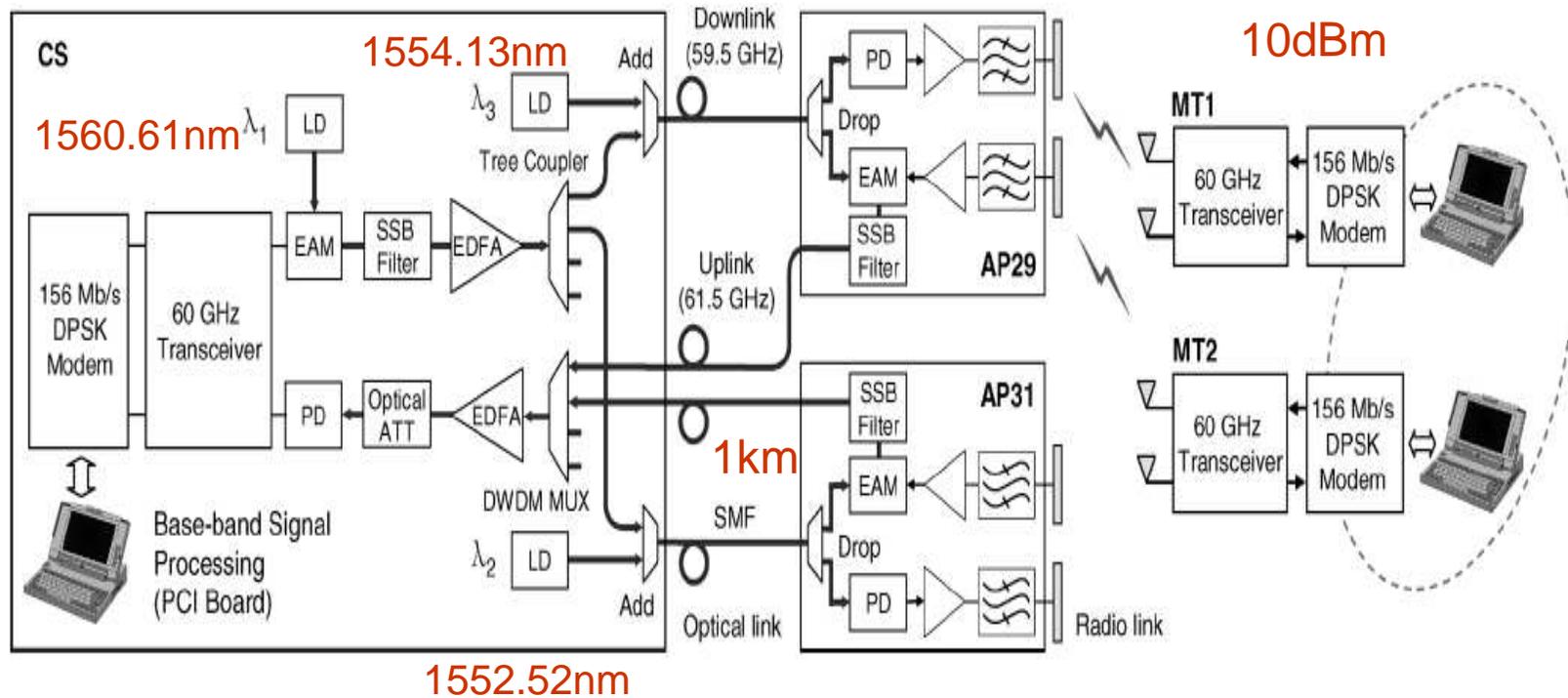


Fig. Comparison of BER characteristics for the MMW transmission using the monolithically integrated EA modulator and an external  $\text{LiNbO}_3$  modulator. a compact optical millimeter-wave (MMW) transmitter by monolithically integrating an active mode-locked laser diode (MLLD) and high-mesa electro-absorption (EA) modulators. From the frequency domain measurements of the 125-GHz optical MMW signal, we obtained a linewidth of less than 10 Hz and a timing jitter of 0.1 ps.

# 60GHz Transmission Experiment

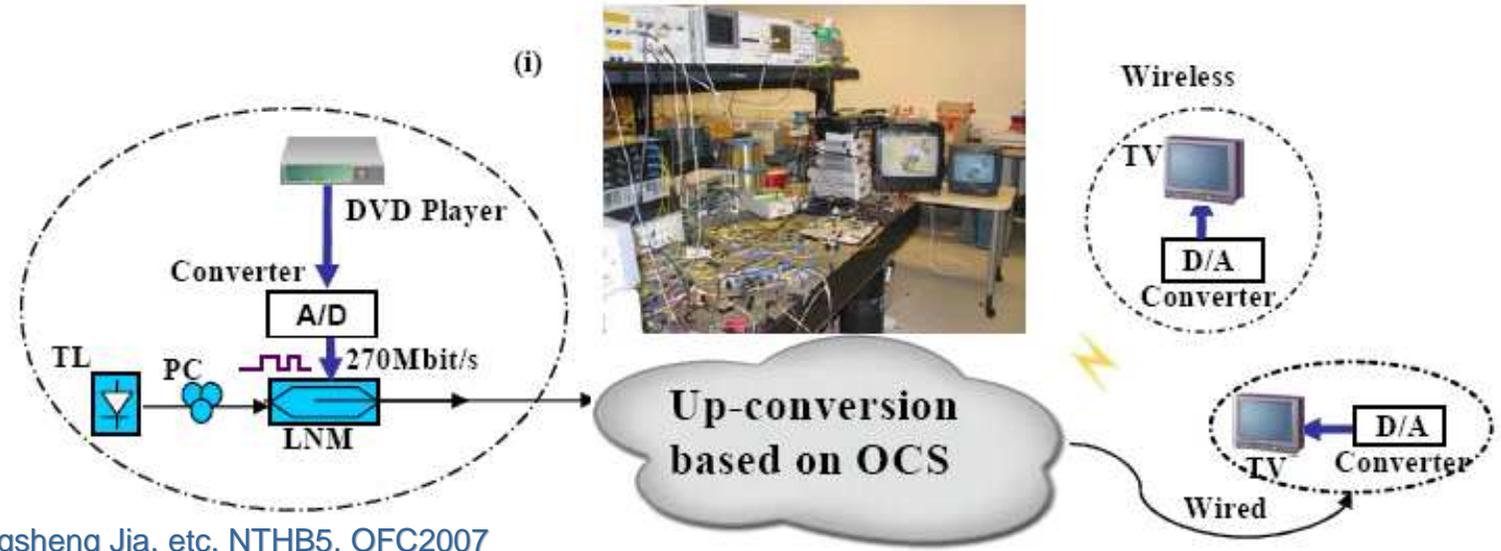
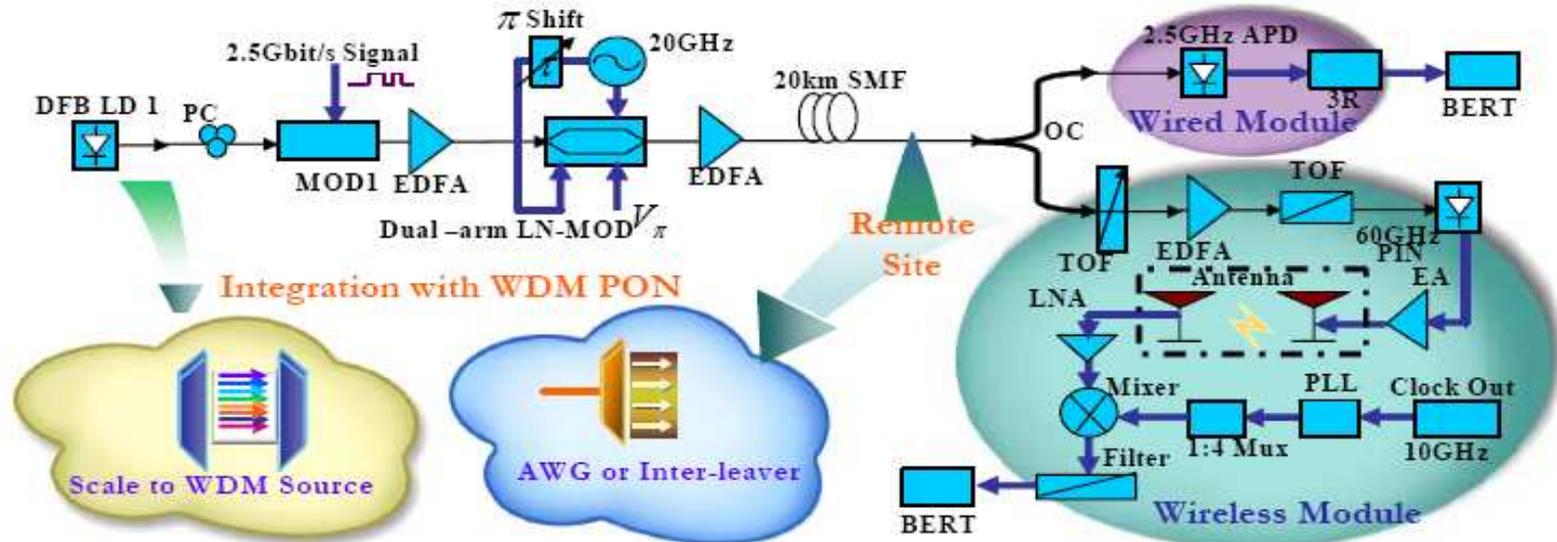


# A Prototype of mm-wave RoF

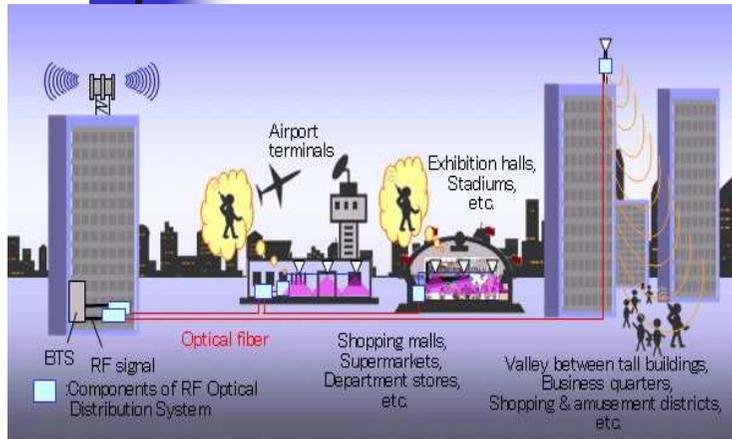


IEEE MTT 2006, pp.1953

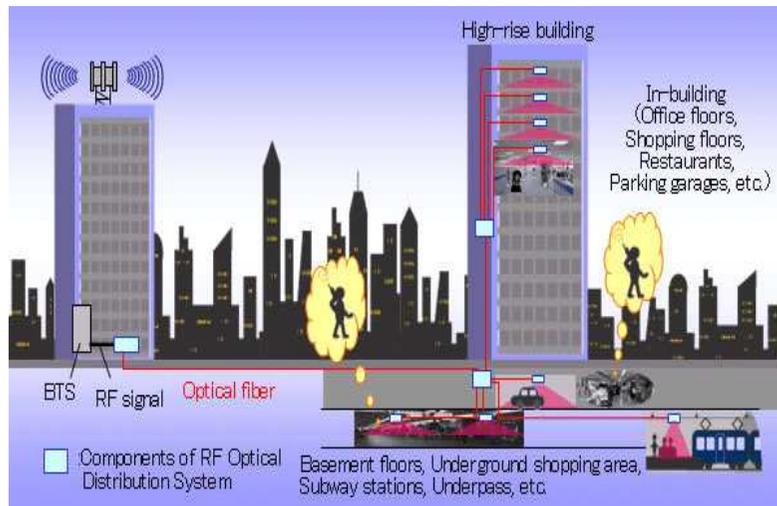
# SDTV Transmission Demonstration



# ROF系统的应用-宽带无线接入



城内ROF

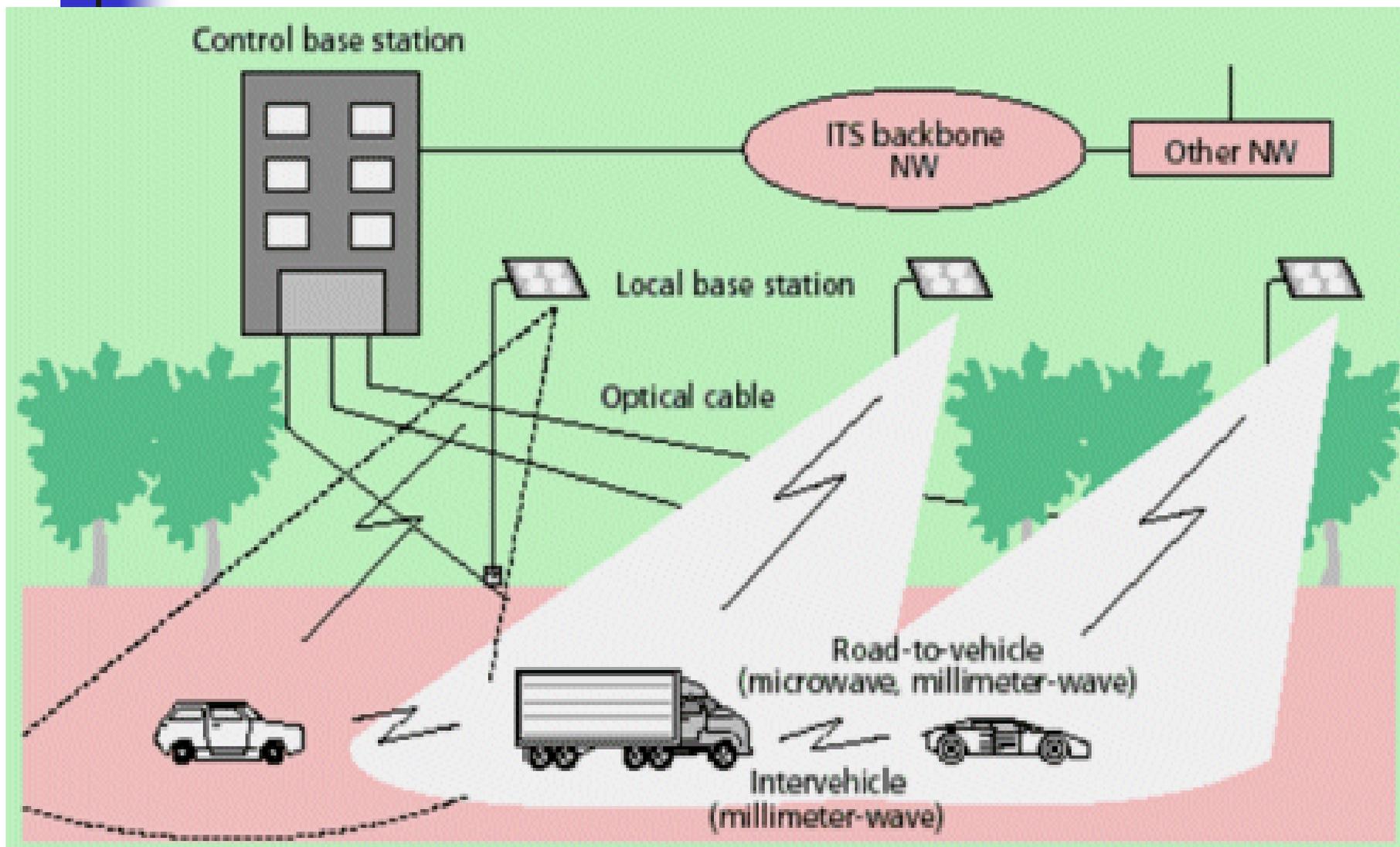


室内ROF

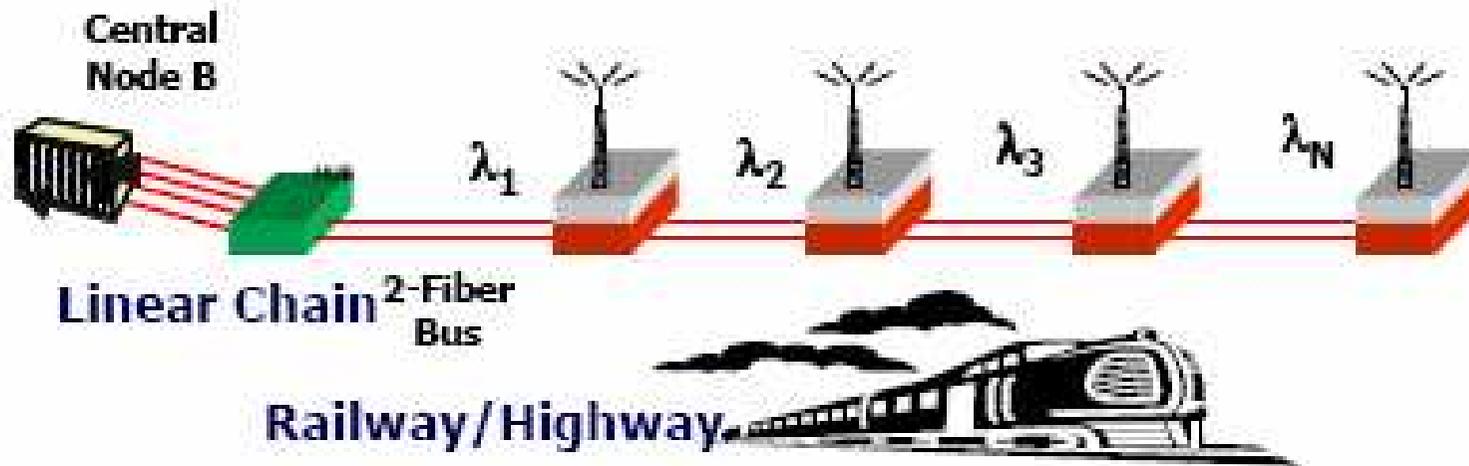
**FUSIONOPOLIS**

- Amenity Club
- Shared Conference Rooms
- Retail and F&B Podium
- Service Apartments for Work-Live
- Skybridges and Roof-top Gardens
- Business Park Space
- 600-seat Theatre

# ROF系统的应用-智能交通系统



# ROF系统的应用- Railway Coverage



*C/D-WDM technique with bus architecture*



# 光控相控阵天线

- 光相控阵天线具有可靠性高、探测能力强、扫描速度快、抗干扰能力强，多波束、实时切换、无惯性跟踪等功能及特点，因此广泛应用于雷达、通信等领域。
- 在军事领域，为了提高抗干扰能力、为了提高雷达的分辨率、识别能力和解决多目标成像问题，对抗反辐射导弹的威胁相控阵雷达必须具有大的瞬时带宽（ $> 10\%$ ），需要使用光真延时技术---**光控PAA**。
- 在移动通信系统领域，移动用户量的剧增、多业务服务导致系统带宽急剧增长，从而需要基于光控波束形成网络的智能天线。
- **光控宽带相控阵雷达**优点不但能消除波束倾斜效应，获得最佳的波束扫描，还具有扫描速度快，分辨率高，抗干扰能力强，大幅度的减轻体积、重量，十分适用于机载雷达系统。**光控相控阵天线在通信中的应用是光控智能天线**。智能天线是一种多天线技术，采用天线阵列形成可控的波束，指向并随时跟踪用户。它具有增加通信容量和速率、减少电磁干扰、减少手机和基站发射功率，并具有定位功能的优点；能减少多径衰落影响，获得更多的用户数或更高数据率。

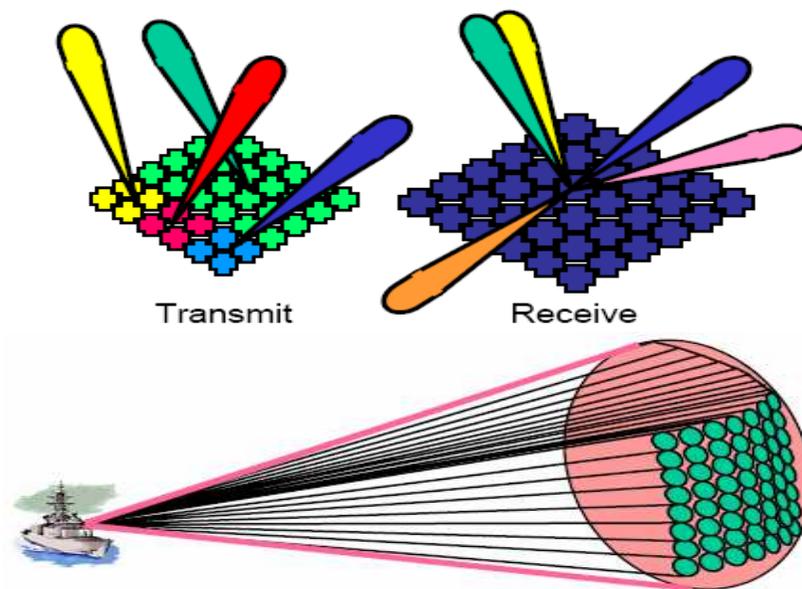


Figure 2. Ubiquitous Radar

# 60GHz毫米波段技术应用前景

- 高的数据速率（或者带宽）需要高的载波频率
- 60GHz 的无线通信系统将会在居住区、办公区、会议室、图书馆等场所大展身手。在家居应用方面，音频/视频传输、桌面网络连接以及对于移动设备的支持。根据许多消费电子产品和个人电脑公司的开发兴趣，**60GHz** 系统应用可以分为以下几类：
  - 高清视频流（**HDTV**节目,高清视频会议）
  - 无线多媒体业务
  - 吉比特无线局域网
  - 无线支持的桌面点到多点的连接
  - .....

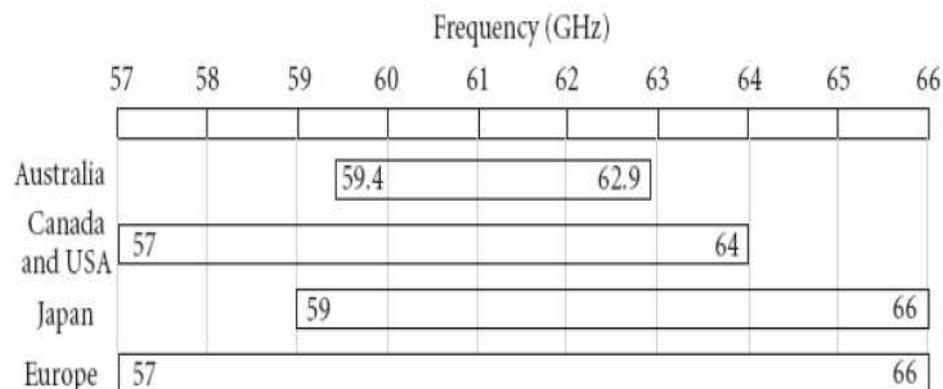
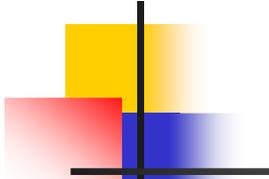
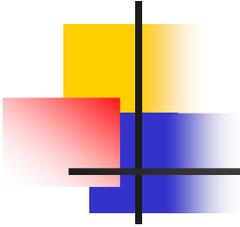


图1 60GHz附近的频谱分配



# 小结

- 日本OITDA在2005财年中(05年6月—06年3月)进行了MWP可行性研究, 完成了报告“ OITDA Feasibility Study Report of Microwave Photonics”
- 委员会有来自日本国内大学、研究所、移动通信运营商、广播中心和设备提供商的 19名成员。
- 在调研的 4 个领域中开发应用的前景得到充分肯定:
  - 移动通信(ROF for mobile phone, WLAN, mmW wireless system)
  - 广播
  - 测量
  - 信号处理
- 器件和技术需求:
  - ROF 系统用的低成本光源 ( FP-LD, VCSEL)
  - 低驱动低压和低成本的 (外) 调制器
  - 高线性度的半导体电吸收调制器 (EAM) 及其与半导体激光器集成器件
  - 利用暗光纤的数字 ROF 系统
  - 解决WLAN应用中数字链路的时间延迟问题。
  - 无电源的远端基站和光泵浦的直流供电系统
  - ROF系统利用多模光纤和波分复用WDM 解决无线业务中的复用技术。



## 小结

---

- 微波技术与光子技术是推动信息技术进步的两大重要学科。微波技术发展至今，在通信、国防等诸多方面获得了卓越的成就；光子技术尤其是光通信是近十年来有着蓬勃生机的新技术增长点，把通信系统的速度和容量提高到了前所未有的程度。两者的相互融合，必将对现代信息技术产生深远的影响。

谢谢！

