

# 基于副载波复用的多输入单输出正交频分复用 LED 可见光通信系统

李荣玲 汤婵娟 王源泉 王一光 邵宇丰 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

**摘要** 提出了一种基于副载波复用的新型的多输入单输出(MISO)正交频分复用可见光通信(OFDM-VLC)系统构架,并且实验验证了 $2 \times 1$ 和 $3 \times 1$ 的MISO OFDM-VLC系统传输。分别测量了 $2 \times 1$ 和 $3 \times 1$ 的实验系统的误差矢量幅度(EVM)随输入电压变化的曲线图,找出了两个系统各自的最佳偏置范围。在将输入电压设置在最佳偏置范围之内的情况下,改变传输距离,对 $2 \times 1$ 系统,给出了系统EVM性能变化的曲线图;对 $3 \times 1$ 系统,给出了系统EVM和误码率(BER)性能变化的曲线图。在没有任何均衡的情况下,两个系统的传输距离都可以长达140 cm。

**关键词** 光通信;可见光通信;正交频分复用;副载波复用;多输入单输出;白光LED

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1105001

## A MISO-OFDM Visible Light Communication System using LED Based on Subcarrier Multiplexing

Li Rongling Tang Chanjuan Wang Yuanquan Wang Yiguang Shao Yufeng Chi Nan

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** A novel configuration of  $2 \times 1$  and  $3 \times 1$  multiple-inputs single-output (MISO) multiple-inputs single output visible light communication (OFDM-VLC) system is reported experimentally. The error vector magnitude (EVM) values varying with the input voltage of  $2 \times 1$  and  $3 \times 1$  systems is measured, and the best ranges of bias voltage is found, respectively. By setting the input voltage in the respective best range, the EVM values of  $2 \times 1$  system, the EVM values and bit error rate (BER) of  $3 \times 1$  system varying with transmission distance are presented. Without equalization, the transmission distance of the two systems can both be as long as 140 cm.

**Key words** optical communications; visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing; subcarrier multiplexing; multiple-inputs single-output; white light-emitting diode

**OCIS codes** 060.2605; 060.4230; 060.4080

## 1 引 言

白光LED现在已经被广泛应用于照明,并且由于其效率高、价格低及寿命长等优点,将逐渐取代现有的照明用光源,如白炽灯、日光灯等<sup>[1]</sup>。白光LED还具有调制性能好、响应灵敏度高的优点,利用LED的这种特性,还可以将信号调制到LED所

发出的可见光上进行传输。白光LED可以将照明与数据传输结合起来的特性,促进了一种新型的无线通信技术,即可见光通信(VLC)技术的发展。总的来说,VLC技术有如下优点:1)以相对低的代价同时实现了通信与照明;2)适用场景非常广泛;3)与其他典型的无线频率相比具有更宽的带宽;4)光

**收稿日期**: 2012-05-29; **收到修改稿日期**: 2012-07-05

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB328300), 国家自然科学基金(600837004, 60777010), 国家 863 计划(2009AA01Z253, 2007AA01Z260), 曙光学者基金, 中国博士后科学基金面上资助项目(20090460593), 上海市博士后资助计划面上项目(A类)(10R21411600)资助课题。

**作者简介**: 李荣玲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: sophielinda2@gmail.com

**导师简介**: 迟楠(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事先进光信号调制, 光标记交换和全光信息处理等方面的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn(通信联系人)

束所覆盖的通信区域是不受常规电磁波干扰的,可以为多个用户提供很大的带宽;5) 可见光不同于波长较长的电磁波,它无法穿透墙壁,这就保证了通信几乎百分之百的安全。由于 VLC 技术的这些优点,加上 LED 技术的发展,以及对适用于各种场景的接入技术的需求,近年来,国内外研究者对 VLC 给予了越来越多的关注<sup>[2~12]</sup>。

VLC 技术的发展也存在着一些限制因素,其中最主要的挑战在于白光 LED 有限的带宽<sup>[6,7]</sup>,从而限制了传输速率。研究者已经提出了多种技术以提高传输比特率。如高阶调制格式<sup>[8]</sup>、蓝光滤波<sup>[9]</sup>、预均衡技术<sup>[10]</sup>、后均衡技术<sup>[7]</sup>、正交频分复用技术 (OFDM)<sup>[11]</sup> 以及光多输入多输出 (MIMO) 技术<sup>[12]</sup>。使用这些技术中的某种技术,或者几种技术相结合,可以大大提高 VLC 系统的传输速率。比如,可以将光 MIMO 技术与 OFDM 技术相结合,OFDM 技术可以克服多径效应,因此它特别适用于 MIMO-VLC 系统。一个  $2 \times 9$  MIMO-OFDM VLC 系统已经被提出,并且实验验证可以传输 220 Mb/s 的信号<sup>[11]</sup>。文献[11]中的 VLC 系统固然获得了很高的数据传输率,但是多个接收机和 MIMO 信号处理使得系统变得非常复杂,并不适于广泛使用。并且,该

系统存在信道间干扰 (ICI),因此要求 LED 之间必须有一定的距离,如果 LED 分布得过于密集,那么 ICI 将成为系统的主要限制因素。

本文提出了一种基于副载波复用的新型的多输入单输出 (MISO)-OFDM VLC 系统构架,并且实验验证了  $2 \times 1$  和  $3 \times 1$  的 MISO-OFDM VLC 系统传输。率先将副载波复用技术与 OFDM 技术和高阶调制格式结合,共同提高系统性能。该系统成本合算、方便升级。容易实现,并且可以广泛应用于各种场景。如水下通信、定位服务等。需要特别说明的是,这个系统非常适用于定位服务,因为采用了副载波复用,从而很容易将不同的发送方区分开来。在实验验证的系统中,信号被调制到 7.50, 13.75, 20.00 MHz 3 个副载波上,因为信号在不同的频段上,所以 ICI 减少了。同时还采用了高阶调制格式,以提高传输比特率。

## 2 原 理

采用副载波复用的  $N \times 1$  ( $N$  输入单输出) MISO-OFDM VLC 系统的原理框图如图 1 所示。来自用户 1 到用户  $N$  的随机二进制比特流首先被调制为相移键控信号 (QPSK) 或者 16 正交幅度调

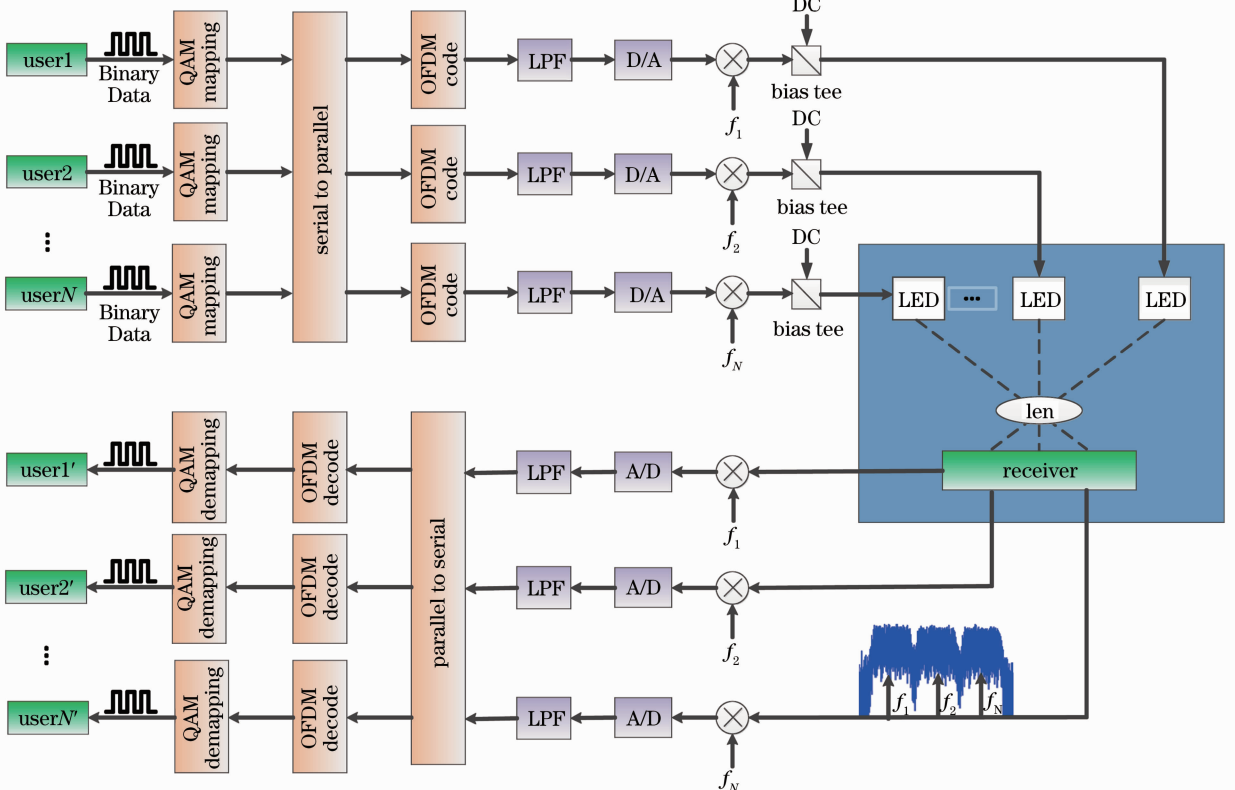


图 1 基于子载波复用的  $N \times 1$  MISO-OFDM VLC 系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of the  $N \times 1$  MISO-OFDM VLC system based on subcarrier multiplexing

研(QAM)格式,然后输入到 OFDM 编码器。这里使用了 128 个正交子载波。OFDM 编码器输出的信号为 QAM-OFDM 格式,将这些并行的  $N$  路信号分别调制到副载波  $f_1 \sim f_N$  上,进行副载波复用。输出的信号和直流偏置电压通过 Bias Tee 之后合为一路信号,因此得到了  $N$  路并行信号。使用这  $N$  路信号分别对  $N$  个 LED 光源进行光强度调制,然后信号以光的形式在空间中进行传输。

来自 LED 的光在室内信道中进行传输,通过接收机前端的透镜,使其聚焦到空间探测器上。在此系统中,接收到的绝大部分能量来自于直射路径。接收到的信号频谱插入在图 1 之中。然后对接收到的信号进行放大、下变频、OFDM 解码、QAM 解调之后,恢复出原始的发送信号,再将信号发送给用户  $1'$  到用户  $N'$ 。

值得一提的是,对于室内白光传输信道,高频的信道增益比低频的信道增益差很多,故信道增益不是均衡的。通过在 OFDM 信号中插入导频信号获得传输信道的频率响应函数  $H$ ,信道的频率响应曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,信道频率响应不是平坦的,低频部分的信道增益大于高频部分,因此实验中低频的副载波传输性能比较好。这里通过频率预均衡技术来改善信道,从而提高系统性能。

### 3 实验设置与结果

根据图 1,搭建了  $2 \times 1$  和  $3 \times 1$  的 MISO-OFDM VLC 实验系统。实验搭建的一个发射机和接收机如

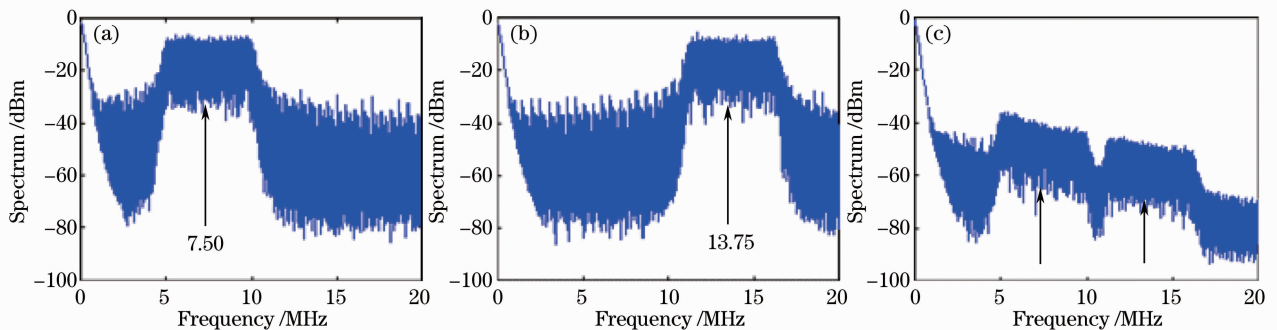


图 4 副载波分别为(a) 7.50 MHz 和(b) 13.75 MHz 时测得的频谱;(c)接收到的信号频谱

Fig. 4 Measured electrical spectrum of the subcarrier at (a) 7.50 MHz and (b) 13.75 MHz; (c) the received data

座图。对输入信号电压与矢量幅度(EVM)的关系进行了观测,实验结果显示在图 5 中。传输距离为 100 cm。从图可以看出,输入电压太大或太小,都不利于信号恢复,此系统的最佳偏压范围为 1.0~1.5 V。图 5 中的插图(a)、(b)分别为偏置电压 1.75 V 时,副载波 7.5 MHz 和 13.75 MHz 的星

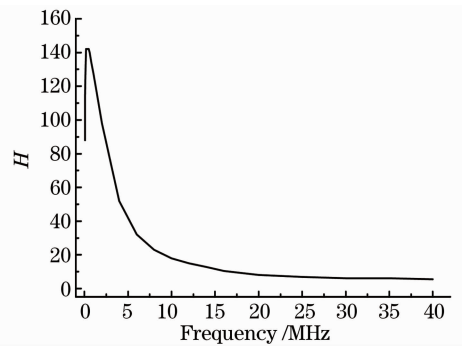


图 2 信道频率响应曲线

Fig. 2 Frequency response of channel

图 3 所示。QAM 调制和 OFDM 编码都是在 Matlab 中完成的,然后再加载到任意波形信号发生器(AWG)中。

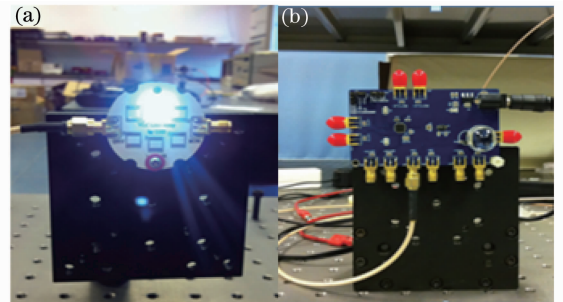


图 3 (a)一个发射机;(b)接收机

Fig. 3 (a) One of the transmitters; (b) receiver

#### 3.1 $2 \times 1$ MISO-OFDM VLC 系统实验

$2 \times 1$  的系统采用的两个副载波频率为 7.50 MHz 和 13.75 MHz,偏置电压设为 3 V。两个发射机发送的信号频谱及接收到的信号频谱如图 4 所示。

座图。

将偏置电压设为 1.5 V,测量了平均 EVM 值随着传输距离而改变的关系,如图 6 所示。图 6 中还给出了传输 90 cm 时,两个副载波的星座图。由图 6 可以得到,EVM 性能随着传输距离的增大而变差。

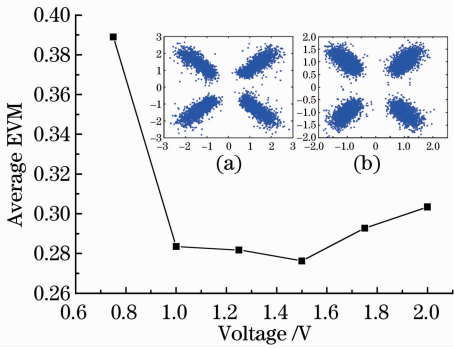


图 5  $2 \times 1$  系统平均 EVM 值随输入电压的变化  
Fig. 5 Average EVM versus input voltage of  $2 \times 1$  MISO-OFDM VLC system

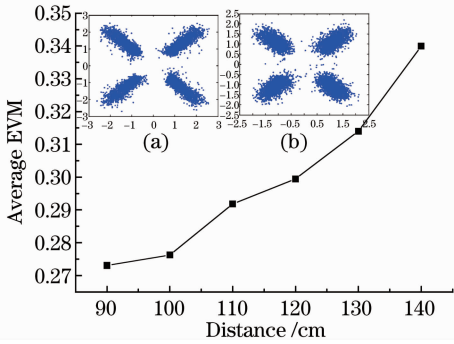
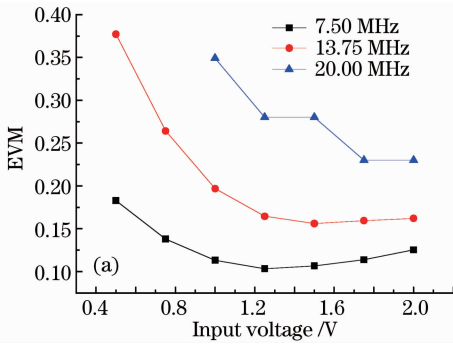


图 6  $2 \times 1$  系统平均 EVM 值随传输距离的变化  
Fig. 6 Average EVM versus transmission distance of  $2 \times 1$  MISO-OFDM VLC system



### 3.2 $3 \times 1$ MISO-OFDM VLC 系统实验

$3 \times 1$  的系统采用的 3 个副载波频率分别为 7.50、13.75、20.00 MHz。偏置电压也设为 3 V。接收到的信号频谱如图 7 所示。

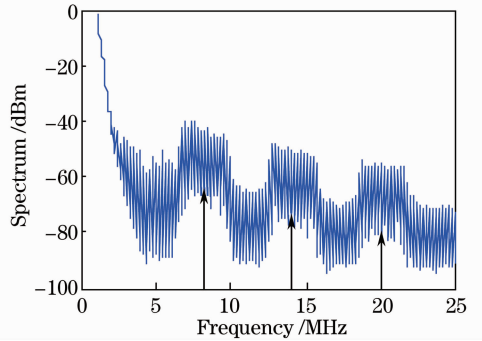


图 7 接收到的信号频谱

Fig. 7 Measured electrical spectrum of the received data

对 EVM 值和误码率(BER)  $n_{BER}$  随着输入信号电压的变化而变化的关系进行了观测。传输距离设定为 100 cm, 输入电压范围为 0.5~2.0 V 之间。测得的结果如图 8 所示。可以看出, EVM 值在输入电压 1.30~1.75 V 范围内达到最小值, 相应的误码率也最小, 此时系统性能最好。那么 1.30~1.75 V 就是系统的最佳偏置范围。在这个范围之内, 电压既不会太大, 以至于超出线性工作区域, 也不会太小, 以至于很难将信号恢复出来。

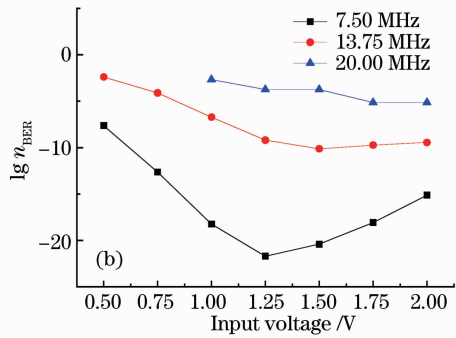


图 8  $3 \times 1$  系统的 (a) EVM 值和 (b) BER 随输入电压变化的曲线图

Fig. 8 (a) EVM and (b) BER versus input voltage of  $3 \times 1$  MISO-OFDM VLC system

将输入电压设定在系统的最佳偏置范围之内, 本文设为 1.5 V, 分别测量 3 路信号的 EVM 值和 BER 随传输距离变化的关系。传输距离为 80~160 cm。实验结果如图 9 所示, 图中的插图 (i)、(ii)、(iii) 分别为副载波 7.50、13.75、20.00 MHz 的星座图。可以看出, EVM 值和 BER 都与传输距离成正相关关系, 即传输距离越远, 系统性能越差。并且频率最低的副载波 EVM 性能和 BER 最好, 频率最高的副载波 EVM 性能和 BER 最差。不使用均衡的情况下, 传输距离不能超过 140 cm, 因为此

时 20 MHz 的副载波几乎不能恢复。

## 4 结 论

提出了一种基于副载波复用的新型的 MISO OFDM-VLC 系统构架, 并且实验验证了  $2 \times 1$  和  $3 \times 1$  的 MISO OFDM-VLC 系统传输, 传输距离可以达到 140 cm。另外, 还采用了高阶调制格式 QAM 以提高系统传输速率。

系统的比特率-距离乘积还需要进一步提高, 以实现室内的宽带光无线接入, 为未来的高清业务做

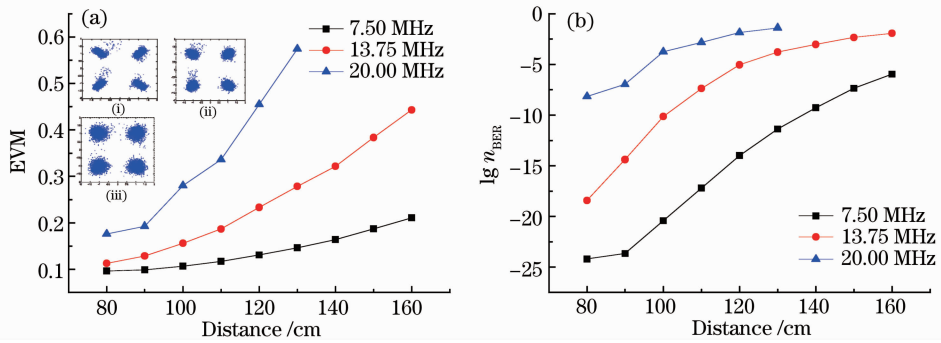


图9 3×1系统的(a) EVM值和(b) BER随传输距离的变化

Fig. 9 (a) EVM and (b) BER versus transmission distance of 3×1 MISO-OFDM VLC system

好准备。下一步期望通过采用更高阶的调制格式、更有效的预均衡、更多的副载波数量、后均衡、蓝光过滤等方式,进一步提高系统的传输速率,增大传输距离。

### 参 考 文 献

- 1 A. B. Siddique, M. Tahir. Joint brightness control and data transmission for visible light communication systems based on white LEDs[C]. CCNC, 2011. 1026~1030
- 2 W. Chen, C. Yu, Y. S. Kwok *et al.*. Video transmission system based on visible light communication[C]. IPOC, 2011. 1~3
- 3 T. Komine, M. Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 2004, **50**(1): 100~107
- 4 H. Le Minh, D. O'Brien, G. Faulkner *et al.*. 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED[C]. ECOC, 2008. 1~2
- 5 H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM, Consumer Electronics [J]. *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 2009, **55**(3): 1127~1134
- 6 H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, D. O'Brien *et al.*. Indoor gigabit optical wireless communications; challenges and possibilities[C]. ICTON, 2010. 1~6
- 7 H. Le Minh, D. O'Brien, G. Faulkner *et al.*. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1063~1065
- 8 K. D. Langer, J. Vucic, C. Kottke *et al.*. Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs [C]. ICTON, 2011. 1~5
- 9 J. Grubor, S. C. J. Lee, K. D. Langer *et al.*. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white light LEDs [C]. ECOC, 2007. 1~2
- 10 H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner *et al.*. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(14): 1243~1245
- 11 A. H. Azhar, T. A. Tran, D. O'Brien. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications[C]. IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications, 2010. 1052~1056
- 12 L. Zeng, D. O'Brien, H. Minh *et al.*. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting [J]. *IEEE Selected Areas in Communications*, 2009, **27**(9): 1654~1662

栏目编辑:胡冰