

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.004

强背景光下 LED 交通灯的可见光通信误码率分析*

秦 岭^{1,2} 郝雅楠² 杜永兴² 巨永锋¹

(1. 长安大学 电子与控制工程学院 西安 710064; 2. 内蒙古科技大学 信息工程学院 包头 014010)

摘要: LED 交通灯的可见光通信将成为室外智能交通系统的发展方向。为了研究和克服信道中强背景光噪声对 LED 交通灯的可见光通信系统的干扰,对其通信信道建立强背景光噪声模型,分别构建了脉冲位置调制(PPM)、扩频(Gold 码)、Gold 码 + PPM 三种不同调制下的通信系统。首先分析了强背景光的相关参数,然后对 PPM、Gold 码、Gold 码 + PPM 三种不同调制下系统误码率性能进行了比较。结果表明,接收机的视场角越小,接收机的直径越小,则通信系统受到背景光噪声的干扰就越小;在相同检测面信号功率下,太阳直射背景光噪声比扩展背景光更加影响系统通信性能;在同一背景光下,误码率最低的是 PPM 调制,其次是 Gold 码,Gold 码 + PPM 的系统误码率最高。以扩展背景光的误码率达到 10^{-4} 作为参考,PPM 通信系统分别比 Gold 码、Gold 码 + PPM 通信系统低 0.125 和 0.5 W 的检测面信号功率。

关键词: 强背景光;LED 交通灯;脉冲位置调制;可见光通信;误码率

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research on visible light communication's BER of LED traffic light under strong background noise

Qin Ling^{1,2} Hao Yanan² Du Yongxing² Ju Yongfeng¹

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: LED traffic light's visible light communication may become the good choice for the outside intelligent transportation system. In order to research and overcome the strong background noise's interference on LED traffic light's visible light communication, a strong background noise model for its communication channels is established. Under three different modulations which are PPM, Gold and Gold + PPM, communication system models are established. Firstly, the relative parameters of strong background light are analyzed, and then the system's BER qualities are compared under PPM, Gold and Gold + PPM. The results show that the smaller field of view of the receiver, the smaller the diameter of the receiver, the smaller interference of the communication system by the background light noise. When detection signal power is the same, the background noise from directed sun light is more influential for system's communication qualities than extension background light. Besides, under the same background noise, the lowest BER is PPM. Gold's BER is middle while system BER of Gold + PPM is the highest. Take extension background light's BER as a reference, when it is 10^{-4} , PPM communication system's detection signal power is 0.125 W and 0.5 W lower than those of Gold and Gold + PPM, respectively.

Keywords: strong background noise; LED traffic light; pulse position modulation; visible light communication; BER

1 引言

智能交通系统(ITS)通过及时获得交通状况信息避

免道路拥堵,减少交通事故的发生,以及降低汽车燃油量,为人们的出行提供方便。然而 LED 交通灯与汽车之间的可见光通信系统可以解决智能交通移动终端的问题,实现照明兼顾信息传输功能。它具有绿色环保,不受

频谱限制,补充现有射频技术的不足,以及设备价格低廉等优点^[1-2]。LED 灯节能环保,被广泛使用^[1,3]。因此 LED 交通灯的可见光通信系统在智能交通系统的应用有广泛的前景^[4],同时成为最近几年的研究热点,得到美国、欧洲等国家的重视与研究^[5]。

目前,可见光通信(VLC)的室内研究比较成熟,具有各种各样的调制方式^[6],信息传输速率达到 Gb/s 级别的水平^[7],信道特性研究和 LED 灯的布局等研究比较完善^[8-9],然而对 ITS 的室外可见光通信系统的研究甚少。Cailean 等人^[10]应用硬件实现了 LED 交通灯的可见光通信系统。Li 等人^[11]提出采用 STBC-OFDM 技术,实现了室外 LED 可见光智能通信系统。但是现阶段 LED 交通灯的可见光通信系统通信存在误码率低,低速率传输问题^[12-13]。这是因为,在 LED 交通灯的室外可见光通信系统受到太阳光和地面反射的背景光干扰,且在信道中必然受到大气中 O₃、CO₂、H₂O 等物质的吸收、散射的影响,因此信道受到严重的衰落,降低了系统误码率,严重影响 ITS 的可见光通信系统的通信质量。

目前的研究中,尚未见到在强背景光信道条件下,PPM 调制的 LED 交通灯与汽车之间的可见光通信系统性能的研究,也没有 Gold 码 + PPM 调制技术的报道。本文建立强背景光的信道模型,对扩展背景光和太阳直射背景光进行了数值分析,并且分析了接收机直径和接收视场角对背景光的影响;比较相同背景光条件下,PPM、Gold 码、Gold 码 + PPM 三种不同调制下 LED 交通灯的室外可见光通信系统的误码性能。

2 背景光噪声模型

背景光噪声是影响智能交通通信系统终端误码率增大和系统接收灵敏度的重要因素之一,由地面物体反射、行星、月亮和太阳释放的热量产生背景光噪声。背景光源分为扩展背景光源和点光源两种。地面物体反射和大气对太阳光的散射时的光源,整个空间充满背景,背景光会出现在整个接收机的视场中,称为扩展背景光源;太阳光直射或其他行星的辐射,可能也可能不出现在检测面中,强度非常大,称为点光源。行星和月亮的辐射和散射强度远远小于太阳,白天的背景辐射强度要比夜晚高几个量级,同时月光辐照度为 10⁻⁹ W/cm² · μm^[14],则获得光源功率及其小,因此被忽略。

任何物体的温度在绝对零度之上被认为是背景辐射源,一般采用黑体辐射模型对背景辐射源进行描述。公式如下:

$$w(\lambda) = \frac{c^2 h}{\lambda^5 \{ \exp[hc/k\lambda T] - 1 \}} \quad (1)$$

式中:λ 为波长;c 为光速,c = 3.0 × 10⁸ m/s;k 为玻尔兹

曼常数,k = 1.380 648 8 × 10⁻²³ J/K;T 为辐射的开尔文温度,太阳表面温度约为 6 000 K;h 为普朗克常数,h = 6.626 069 57 × 10⁻³⁴ J · s。

背景光噪声功率公式如下。

1) 扩展光源功率为:

$$P = w(\lambda) \times A \times \Delta\lambda \times \Omega_{fv} \quad (2)$$

2) 点光源功率为:

$$P = w(\lambda) \times A \times \Delta\lambda \quad (3)$$

式中:W(λ) 为日光的辐射谱函数,Δλ 为滤波器的带宽(Δλ = 150 MHz),A 为接收机的光学孔径面积(A = π(D/2)² = 1/4πD²),接收机立体角为 Ω_{fv}(θ 为接收机的视场角,则 Ω_{fv} = 2π[1 - cos(θ/2)] ≈ πθ²/4)。

太阳光通过大气时,由于 CO₂、H₂O、O₃ 等气体的吸收和散射作用,于是大气透过率设为 T(T = 0.5),因此式(2)、(3)可以写成:

扩展光源功率为:

$$P = w(\lambda) \times A \times \Delta\lambda \times \Omega_{fv} \times T \quad (4)$$

点光源功率为:

$$P = w(\lambda) \times A \times \Delta\lambda \times T \quad (5)$$

图 1 所示为可见光波段接收机接收的背景光功率示意图,背景光功率达到零点几瓦,在 483、484 nm 时背景光达到最大值,太阳光直射的背景光功率接近扩展光源的背景光功率的 2 倍,可见直射太阳光远大于扩展光源的背景光。

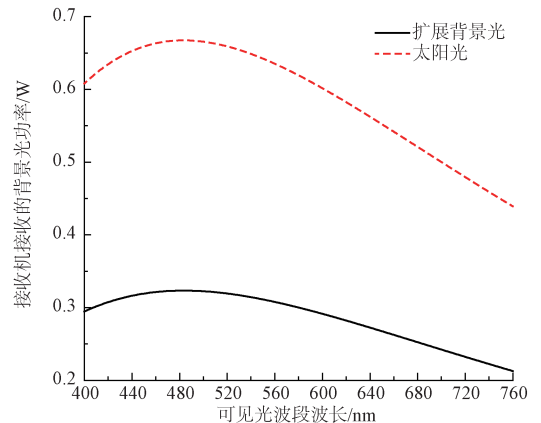


图 1 可见光波段接收机接收的背景光功率
Fig. 1 The received background light power of the visible light wave receiver

3 Gold 码与 PPM 调制技术

3.1 Gold 码

本文采用 Gold 码与信号序列模二加的直接序列扩频法达到远远大于基带信号带宽效果。

Gold 码发生器结构如图 2 所示,是由两个 10 级的线性反馈移位寄存器分别对应 G_1, G_2 两个 m 序列^[15],这两个寄存器分别采用二输入异或,六输入异或通过反馈方式连接保证输出不同的状态,其码长都为 1023,于是得到 1023 个不同的 Gold 码。在相同时钟、初相条件下, $G_1(t)$ 通过 G_1 发生器中 a_{10} 输出, $G_2(t)$ 中 S_1 和 S_2 通过相位选择器进行模 2 加运算,再与 $G_1(t)$ 再次进行模 2 加生成 G 码,即得到 Gold 码。

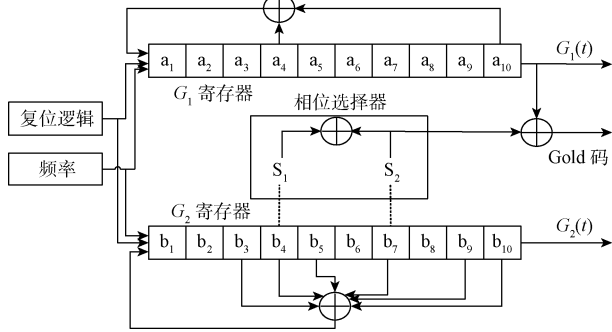


图 2 Gold 码发生器
Fig.2 Gold code generator

在实际信息处理,传递过程需要一定时间产生信息延迟,通过对 Gold 码发生器的相位延迟和抽头选取解决此问题。接收到的数据与不同的 Gold 码序列结合,通过 Gold 码的相关特性查找峰值解出原始数据,从而完成扩频与解扩频的过程。

3.2 PPM 调制与解调

通过控制脉冲位置对信息进行调制的技术称为 PPM 调制,调制简单且安全,易于实现调制功能,普遍应用于光通信等比较先进的通信领域。

发射端将长度 n 个二进制连续数字信号映射为 L 个时隙, L 个时隙中某一个时隙的位置放置一个脉冲,即 $L = 2^n$ 。表达式为:

$$\beta = u_1 + 2u_2 + \dots + 2^{n-1}u_n \quad (6)$$

β 表示脉冲所在时隙位置, $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 表示 n 个二进制数。由公式看出 U 与 β 是一一对应关系。举例说明:如 2-PPM,当 $U = (0,0)$ 时, $\beta = 0$;当 $U = (1,0)$ 时, $\beta = 1$;当 $U = (0,1)$ 时, $\beta = 2$;当 $U = (1,1)$ 时, $\beta = 3$ 。

一帧包括帧头和帧头,帧头用于 PPM 解调时查找确定一帧信息的脉冲位置。本文帧头采用 32 个时隙,32 时隙含连续 4 个脉冲用于找第 33 到 288 时隙之间携带信息的脉冲,确定脉冲的位置。只有找到帧头,方能确定脉冲位置。

系统用 8 位 ($n = 8$) 的 PPM 调制,一帧包括 32 个时隙的帧头和 256 个时隙的信息帧。帧头为 32'b0000_0000_0000_0000_1111_0000_0000_0000,用于 PPM 解调时查找确定一帧信息的脉冲位置。帧头含连续 4 个脉冲用于找第 33 到 288 时隙之间带信息的脉冲,确定脉冲的位置,然后进行连除运算解调 PPM。

4 系统仿真结果与分析

强背景光条件下 LED 交通灯的可见光通信系统如图 3 所示。在强背景光条件下,分别进行 PPM 光通信系统、Gold 码、Gold 码 + PPM 光通信系统的仿真。PPM 光通信系统,发射端,信源通过 PPM 调制将电信号转换为光信号到 LED 交通灯,光信号经过强背景光的信道到达接收端,接收端经过 PPM 解调,得到原始的信息,计算误码率;Gold 码 + PPM 调制的光通信系统,在发射端,首先进行扩频,扩频后的数据映射为 PPM 编码调制到 LED 交通灯上,信息通过强背景光的信道,在接收端,先经过 PPM 解调,然后进行解调扩频码,恢复出原始数据,进行误码率计算;Gold 码光通信系统,在发射端,信号通过扩频,在信道中经过强背景光,接收端进行解扩频将信息解调出来,计算误码率。最后对这 3 种经过强背景光信道的 LED 交通灯光通信系统的误码率进行比较。

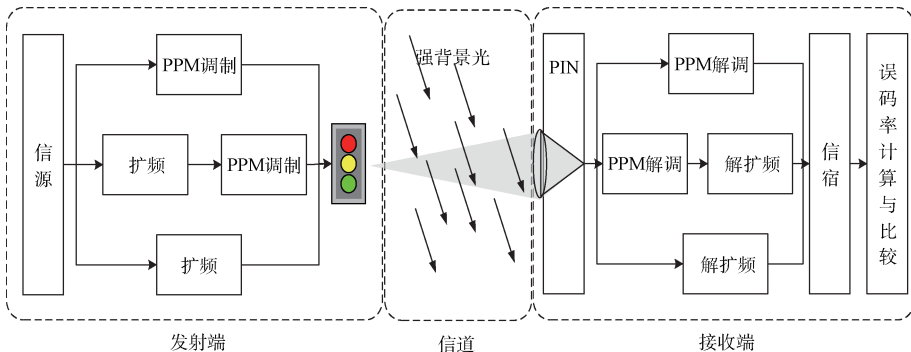


图 3 强背景光条件下 LED 交通灯的可见光通信系统

Fig.3 The visible light communication system of LED traffic light under the condition of strong background light

在LED交通光通信系统中,选择LED交通灯中的红灯波长为650 nm,仿真得到接收扩展光功率与光接收机的直径和接收视场角的关系如图4、5所示。图4所示为采用接收视场角为45°时,随着接收机的直径减小,背景光功率减小。图5所示为在接收机直径为4 mm时,接收机视场角越大,接收的光功率越大。因此接收机的视场角越小,接收机的直径越小,LED交通灯的光通信系统受到背景光噪声的干扰就越小。

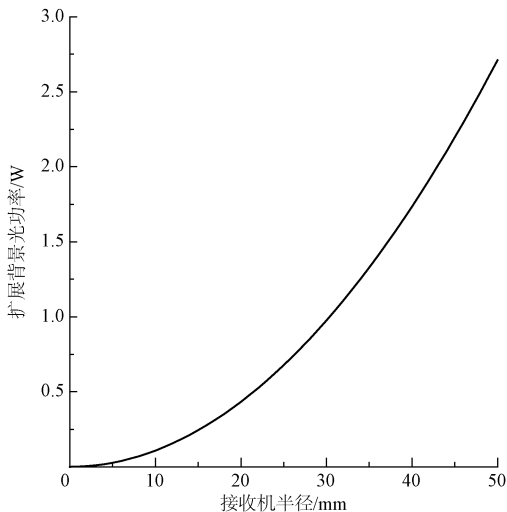


图4 扩展背景光功率与接收机半径的关系
Fig. 4 The relationship of extension background light power and receiver radius

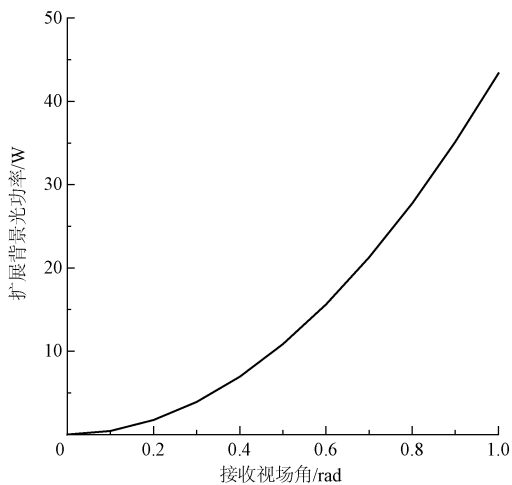
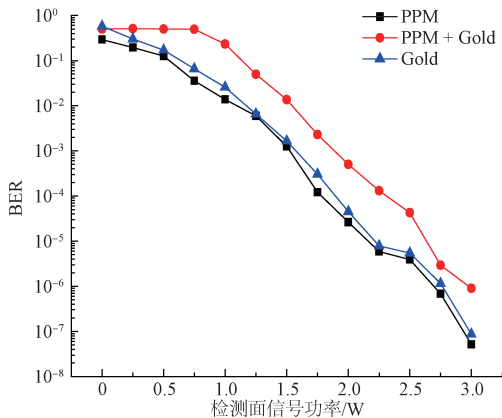


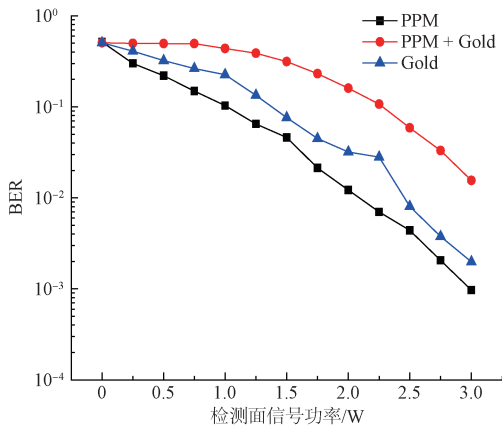
图5 扩展背景光功率与接收视场角的关系
Fig. 5 The relationship of extension background light power and receiving field of view angle

仿真条件为接收机直径4 mm,接收机视场角45°,得到如图6所示曲线。图6为PPM、Gold码、Gold码+PPM三种调制下的光通信系统,得到的系统误码率随

检测面信号功率变化的曲线,图6(a)为扩展背景光下仿真得到的曲线,图6(b)是太阳直射背景光得到的曲线。从两幅图中可以看出PPM调制下的LED交通灯的光通信效果最佳,误码率最低;Gold码的LED交通灯的光通信系统略差;Gold码+PPM调制的LED交通灯的光通信系统通信效果最差,误码率高。这是因为,图6(a)以 10^{-4} 的误码率作为参考,PPM通信系统比Gold码通信系统的检测面信号功率降低0.125 W,比Gold码+PPM调制的通信系统的检测面信号功率降低0.5W;图6(b)以1.25 W的检测面信号功率作为参考,PPM通信系统的误码率比Gold码通信系统低51.6%,比Gold码+PPM调制的通信系统低83.3%。图6(a)与(b)比较,相同检测面信号功率下,由图可得扩展背景光通信系统误码率明显比太阳直射通信系统误码率低,说明太阳直射背景噪声比背景光噪声对通信系统影响更大。



(a) 扩展背景光
(a) Extension background light



(b) 太阳直射背景光
(b) The sun light in the background

图6 不同通信系统下,系统误码率随检测面信号功率的变化曲线

Fig. 6 The curve of the system BER along with the change of signal to noise ratio under different communication system

5 结 论

本文对 LED 交通灯的室外可见光通信建立强背景光的信道模型,两种类型背景噪声功率值大约为零点几瓦,可见强背景光严重影响 ITS 的可见光通信系统性能。提出分别减小接收机直径和视场角,同时建立 PPM 调制的智能交通的可见光通信系统可以降低强背景光的干扰。仿真结果表明,PPM 调制的系统误码率最低,信号接收效果最佳,其次是 Gold 码,最差的是 Gold 码 + PPM 的光通信系统。以扩展背景光的误码率达到 10^{-4} 作为参考,PPM 通信系统比 Gold 码通信系统所需检测面信号功率低 0.125 W,比 Gold 码 + PPM 调制的通信系统低 0.5 W。并且扩展背景比太阳直射背景光的光通信系统误码率低。

参考文献

- [1] VIJAY S, GEETHA K. A Survey on visible light communication appliances used in inter-vehicular and indoor communication [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11 (7): 4893-4897.
- [2] 刘峰,邵晖,李远朝,等. 射频电路噪声系数的测量方法研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(12): 4-8.
LIU F, SHAO H, LI Y CH, et al. RF circuit noise factor measurement method research [J]. Journal of Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33 (12): 4-8.
- [3] 何素梅,傅锦良,吴海彬. LED 隧道照明自动调光系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(4): 622-629.
HE S M, FU J L, WU H B. Design of automatic dimming system for tunnel LED lighting [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (4): 622-629.
- [4] 宋小庆,赵梓旭,陈克伟,等. 可见光通信应用前景与发展挑战 [J]. 激光与光电子学进展, 2015 (8): 36-44.
SONG X Q, ZHAO X X, CHEN K W, et al. Visible light communication: Potential applications and challenges [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015(8): 36-44.
- [5] KIM D R, YANG S H, KIM H S, et al. Outdoor visible light communication for inter-vehicle communication using controller area network [C]. International Conference on Communications & Electronics, 2012.
- [6] WEI C C, WU F M, CHEN Z Y, et al. Indoor VLC system with multiple LEDs of different path lengths employing space-time block-coded DMT/CAP modulation [J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(3): A459-A466.
- [7] WANG Y, HUANG X, TAO L, et al. 4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization [J]. Optics Express, 2015, 23 (10): 13626-13633.
- [8] 沈振民. 基于 LED 的室内可见光通信信道建模及光学接收端研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2014.
SHEN ZH M. Based on the visible LED indoor optical communication and optical receiver channel modeling research [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [9] 刘彦飞,代永红,单欣,等. 高帧频 CMOS 相机对光通信精跟踪系统影响分析 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1319-1325.
LIU Y F, DAI Y H, DAN X, et al. Analysis of the impact of high frame frequency CMOS camera on optical communication fine tracking system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1319-1325.
- [10] CAILEAN A M, CAGNEAU B, CHASSAGNE L, et al. Design and implementation of a visible light communications system for vehicle applications [C]. IEEE 21st Telecommunications Forum, 2013.
- [11] LI C, YI Y, LEE K, et al. Performance analysis of visible light communication using the STBC-OFDM technique for intelligent transportation systems [J]. International Journal of Electronics, 2014, 101(8): 1117-1133.
- [12] WANG Y, CHI N. Long-range high-speed visible light communication system over 100-m outdoor transmission utilizing receiver diversity technology [J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 056104.
- [13] LOURENCO N, TERRA D, KUMAR N, et al. Visible light communication system for outdoor applications [C]. International Symposium on Communication Systems, 2012.
- [14] 张爱丽. 强天空背景光条件下空间激光通信系统的光斑检测技术研究 [D]. 长春:长春理工大学, 2011.
ZHANG AI L. Flare detection technology of space laser communication system under strong background light [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [15] 张松,张亚. 基于 m 序列的无串扰超声波测距系统 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 19-24.
ZHANG S, ZHANG Y. NO crosstalk ultrasonic ranging aysstem based on m sequence [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(9): 19-24.

作者简介



秦岭, 1979 年出生, 博士, 副教授。目前主要研究方向为无线光通信技术。
E-mail: qinling1979@imust.edu.cn

Qin Ling was born in 1979, Ph. D. candidate in Chang'an University, and associate professor in Inner Mongolia University of Science & Technology. Her present research direction is wireless optical communication technology.



郝雅楠, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要研究领域为无线光通信技术。
E-mail: haoyanankd@163.com

Hao Yanan was born in 1991, M. Sc. candidate of Inner Mongolia University of Science & Technology. Her present research direction is wireless optical communication technology.



杜永兴, 1980 年出生, 博士, 副教授, 主要研究领域为无线光通信技术。
E-mail: dyxql@imust.edu.cn

Du Yongxing was born in 1980, graduated from Xi'an University of Technology, Ph. D., and associate professor in Inner Mongolia University of Science & Technology. His present research direction is wireless optical communication technology.



巨永锋, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能交通技术。

Ju Yongfeng was born in 1962, Ph. D., professor and Ph. D. supervisor in Hefei University of Technology. His present research direction is intelligent transportation technology.