

基于脉冲激光在大气中传输的信道补偿

姚海峰^{1,2}, 倪小龙², 陈纯毅², 佟首峰², 姜会林², 刘智^{2*}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为了研究矩形脉冲激光在大气中的传输特性,建立了脉冲信号在大气中传输的数学模型,并提出了一种信道补偿算法。在相距 6.2 km 的两栋高楼之间开展了 100 MHz 的矩形脉冲传输实验,并在 FPGA 编译软件上对信道补偿算法进行了验证。结果表明:脉冲信号经过大气信道后发生了畸变,大气信道在频域上表现为一个低通系统,抑制了大于 430 MHz 的高频信号。运用信道补偿算法后,脉冲畸变得得到有效抑制,系统带宽得到拓宽,信号的信噪比提高了 5 倍左右;当光信噪比为 10 dB 时,误码率降低为 10^{-6} 。

关键词 大气光学; 脉冲畸变; 信道补偿; 信噪比; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0101003

Channel Compensation Based on Pulse Laser Propagating in Atmosphere

Yao Haifeng^{1,2}, Ni Xiaolong², Chen Chunyi², Tong Shoufeng², Jiang Huilin², Liu Zhi²

¹ School of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China;

² Key Discipline for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to investigate the propagation characteristics of rectangular pulse laser in atmosphere, a mathematical model of pulse signal propagation in atmosphere is established and a compensation algorithm for channel is proposed. A propagation experiment of 100 MHz rectangular pulse is carried out between two buildings with a distance of 6.2 km, and the compensation algorithm for channel is verified by FPGA compiling software. The experimental results indicate that the pulse signal is distorted after passing through the atmospheric channel. The performance of atmospheric channel can be considered as a low-pass system in the frequency domain and signals with high frequency larger than 430 MHz are suppressed. With the channel compensation algorithm, the distortion of rectangular optical pulse is suppressed effectively, the system bandwidth is improved, and the signal noise ratio is increased by 5 times. The bit error rate decreases to about 10^{-6} when the optical signal noise ratio is 10 dB.

Key words atmospheric optics; pulse distortion; channel compensation; signal noise ratio; bit error rate

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1330

1 引 言

自由光通信(FSO)作为一种新型的无线通信方式,是解决“最后一公里”的关键技术之一,越来越受

到人们的关注。但近地表的大气湍流运动导致传输光束波前发生随机起伏,引起光束漂移、光束扩展和强度起伏等现象,使得光束质量变坏,影响通信传输^[1-3]。大气中存在的不同尺度的散射粒子会对光

收稿日期: 2017-06-13; 收到修改稿日期: 2017-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(61475025,61775022)、国防科工局基础科研基金(A362080230)

作者简介: 姚海峰(1990—),男,博士研究生,主要从事大气光学与空间激光通信传输方面的研究。

E-mail: custfeng@outlook.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间遥感与激光通信等方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

* 通信联系人。E-mail: liuzhi@cust.edu.cn

信号传输产生多次散射作用,造成多径效应,使得脉冲强度在时域上发生畸变,造成波形幅度失真和码间干扰(ISI),进而使得误码率(BER)升高,严重影响激光通信系统的性能^[4-6]。鉴于大气信道的复杂性,需要对信道进行补偿,提升通信系统的质量。目前已公开的文献大部分是关于脉冲在理想条件下的技术研究,而对于脉冲在真实实验条件下经过大气信道的波形变化的研究较少。其原因是真实实验条件下采用野外测量、重复实验等手段,不仅消耗了大量的人力、物力和财力,而且较难实现。此外,信道补偿的研究主要集中在利用自适应技术并从光学角度补偿大气信道所带来的影响,很少针对传递函数进行信道补偿算法的研究,以提高整个FSO调制带宽和信噪比(SNR),并降低BER^[7-8]。因此,开展基于脉冲激光信号在大气中传输特性的信道补偿研究并进行野外脉冲激光传输实验,对于研究FSO系统的实际传输具有重要的意义。

本文研究了矩形脉冲激光信号在大气信道中的传输特性和基于这种脉冲特性的信道补偿算法。通过建立传输模型并进行外场实验,分析了脉冲特性。实验表明:大气信道引起的矩形脉冲在时域上发生畸变,这种畸变在频域上表现为低通性。同时,针对信道补偿算法设计了6.2 km的伪随机二进制序列(PRBS)码传输实验。结果表明:该算法有效地抑制了脉冲畸变,提高了系统带宽,将信号的SNR提高了5倍左右;当光信噪比(OSNR)为10 dB时,BER降低为 10^{-6} ,这验证了该算法的有效性,为进一步设计FSO通信系统提供了参考。

2 脉冲传输特性模型

2.1 大气信道脉冲传输特性模型

大气信道的好坏可以用大气折射率结构常数 C_n^2 、湍流尺度 l_0 和信道长度 L 来表征,假设在某一海拔处、某一时间内,天气情况稳定,即 C_n^2 、 l_0 和 L 在空间和时间区间内恒定,可以认为是一个稳定的时不变系统。高斯脉冲穿过大气信道后的脉冲展宽可以通过高斯滤波器的时间域响应进行模拟,此高斯脉冲穿过大气信道后的输出信号仍然是高斯形状的脉冲^[9-14],故可将大气信道在频域的传递函数假设为

$$H_c(j\omega) = \mu \exp(-\alpha^2 \omega^2), \quad (1)$$

式中 μ 为大气信道引起的衰减因子, α 为带宽常数, ω 为角频率。文献[10]中给出了输出的高斯脉冲半宽度模型,由此可以推导出

$$\alpha = 0.322 \frac{\sigma_1^2 \Theta_0^{-5/6}}{\omega_a^2}, \quad (2)$$

式中 $\sigma_1^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$,表示Rytov方差,其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $\omega_a = kc$,其中 c 为真空中的光速; $\Theta_0 = L/(kl_0^2)$,表示无量纲湍流尺度。

假设发射端发出脉冲宽度为 τ 、幅度为 A 、周期为 T 的矩形脉冲,则时域波形可表示为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{A\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \exp(jn\omega t), \quad (3)$$

式中 $\text{Sa}(t) = \sin t/t$ 为抽样函数。若忽略背景光的噪声,则整个接收端的信号可表示为

$$y(t) = \Gamma\eta x(t) \otimes h_c(t) + n(t), \quad (4)$$

式中 \otimes 表示卷积运算; $n(t)$ 为探测器高斯白噪声,其均值为0,方差为 σ_n^2 ; η 为探测器的灵敏度; Γ 为放大器的系数; $h_c(t)$ 为大气信道在时域的传递函数。

为分析方便,引入截短函数 $S_T(t)$, $-T/2 < t < T/2$,则系统的频谱函数和功率谱函数可分别表示为

$$Y(j\omega) = \Gamma\eta\mu \exp(-\alpha^2 \omega^2) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{A\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) + \int_{-T/2}^{T/2} n(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (5)$$

$$p(j\omega) = \Gamma^2 \eta^2 \mu^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{A\tau}{T}\right)^2 \text{Sa}^2\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \times \int_{-T/2}^{T/2} [\exp(-\alpha^2 \omega^2)]^2 d\omega + Tn_0. \quad (6)$$

对以上矩形脉冲在大气信道中的传输模型进行时域数值仿真,其中仿真参数 $\sigma_1^2 = 0.7$, $\Theta_0 = 2.47 \times 10^{-4}$, $\Gamma = 1$, $\eta = 1$, $u = 0.5$, $n(t)$ 取SNR为10的高斯白噪声,如图1所示。随着矩形脉冲频率的增加,脉冲展宽的比例增加。当脉冲频率为100 MHz时,脉冲畸变约为2.682 ns,且伴有噪声,其脉冲半宽度保持在5.000 ns。

2.2 信道补偿后的脉冲传输模型

在大气传输过程中引入一个信道补偿函数 $G(j\omega)$,则传输方程可表示为

$$Y_g(j\omega) = X(j\omega) H_t(j\omega) H_c(j\omega) H_r(j\omega) G(j\omega), \quad (7)$$

式中 $Y_g(j\omega)$ 为经信道补偿后的频域信号, $X(j\omega)$ 为 $x(t)$ 对应的频域信号, $H_t(j\omega)$ 为发射端的传输函数, $H_r(j\omega)$ 为接收端的传输函数。为使 $Y_g(j\omega) = X(j\omega)$,则有 $H_t(j\omega) H_c(j\omega) H_r(j\omega) G(j\omega) = 1$,从而得到

$$G(j\omega) = 1/[H_t(j\omega) H_c(j\omega) H_r(j\omega)] \xrightarrow{D} \sum_{k=0}^m \omega(k) z^{-k}, \quad (8)$$

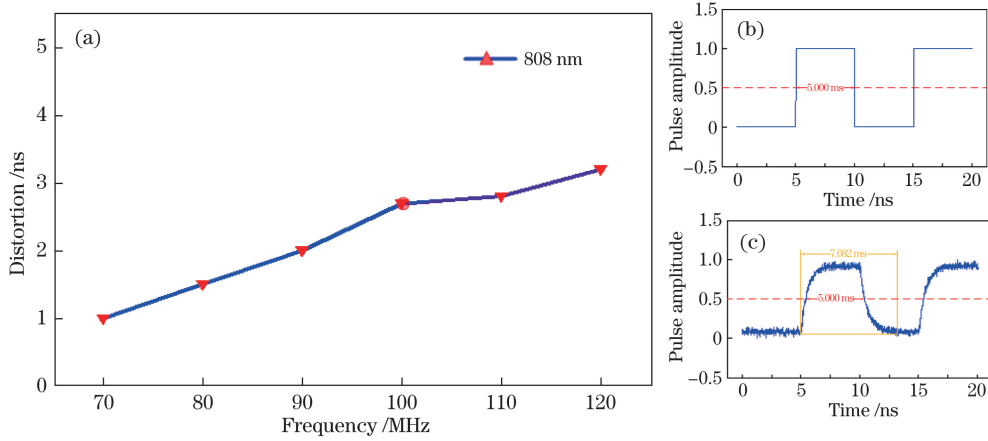


图 1 (a)波形畸变随频率的变化;(b)理想矩形脉冲;(c)仿真脉冲

Fig. 1 (a) Variation in waveform distortion with frequency; (b) ideal rectangular pulse; (c) simulated pulse

式中 D 表示数字化处理; $z = \exp(j\omega)$, ω 为抽头系数; m 为抽头个数。 ω 和 m 决定 $G(j\omega)$ 补偿算法的效率和收敛速度, 当 $m \rightarrow \infty$ 时, (8) 式可取等号。联合 (5)、(7) 和 (8) 式, 可知经信道补偿后的时域信号表达式为

$$y_{gj} = \sum_{i=1}^m \omega_i y_{ij} = \mathbf{Y}_j^T \mathbf{W} = \mathbf{W}^T \mathbf{Y}_j, \quad (9)$$

式中 $\sum_{i=1}^m \omega_i y_{ij}$ 为 (7) 式的数字信号表示形式^[15], $\mathbf{W} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_m]^T$, $\mathbf{Y}_j = [x_{1j} \ x_{2j} \ \dots \ x_{mj}]^T$ 。引入均方误差 $E[e_j^2]$ 作为评价函数, 用来评价 y_{gj} 的好坏, 即

$$E[e_j^2] = E[(x_j - y_{gj})^2] = E[x_j^2] - 2E[x_j \mathbf{Y}_j^T] \mathbf{W} + \mathbf{W}^T E[\mathbf{Y}_j \mathbf{Y}_j^T] \mathbf{W}. \quad (10)$$

令 $\mathbf{R}_{xy} = E(x_j \mathbf{Y}_j^T)$ 为互相关矩阵, $\mathbf{R}_{yy} = E(\mathbf{Y}_j \mathbf{Y}_j^T)$ 为自相关矩阵, 则 (10) 式可变为

$$E[e_j^2] = E[x_j^2] - 2\mathbf{R}_{xy}^T \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{R}_{yy} \mathbf{W}. \quad (11)$$

由对称矩阵和正定矩阵性质可知, (11) 式是一个开口向上的抛物面, 对其取梯度 ∇ 可得

$$\nabla_j = \left[\frac{\partial E(e_j^2)}{\partial \omega_1}, \frac{\partial E(e_j^2)}{\partial \omega_2}, \dots, \frac{\partial E(e_j^2)}{\partial \omega_m} \right]^T = 2\mathbf{R}_{yy} \mathbf{W} - 2\mathbf{R}_{xy}. \quad (12)$$

当 $\nabla_j = 0$ 时, (11) 式可取得最小极值, 因此可得

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{R}_{xy}. \quad (13)$$

由 (13) 式可以看出, \mathbf{W} 可通过 \mathbf{R}_{yy} 和 \mathbf{R}_{xy} 求出, 此时的 \mathbf{W} 值为 $E[e_j^2]$ 的极值点, 可使均方差最小、补偿函数性能达到最优。

将 (8) 式分别代入 (5)、(6) 式, 可得到补偿后的信号频谱和信号功率分别为

$$Y_g(j\omega) = \Gamma \eta \mu \exp(-\alpha^2 \omega^2) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^m \frac{A\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \times$$

$$\omega(j\omega) \exp(-j\omega k) + \sum_{k=0}^m \omega(j\omega) \times \exp(-j\omega k) \int_{-T/2}^{T/2} n(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (14)$$

$$p_g(j\omega) = \Gamma^2 \eta^2 \mu^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^m \left(\frac{A\tau}{T}\right)^2 \text{Sa}^2\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \times \int_{-T/2}^{T/2} [\exp(-\alpha^2 \omega^2)]^2 |\omega(j\omega) \exp(-j\omega k)|^2 d\omega + T n_0 \sum_{k=0}^m \int_{-T/2}^{T/2} |\omega(j\omega) \exp(-j\omega k)|^2 d\omega. \quad (15)$$

由 (14) 式可知, 引入的补偿函数 $G(j\omega)$ 抵消了 $H_c(j\omega)$ 恶化的影响, 有利于改善信号畸变。同时, 从 (15) 式可以得出, $G(j\omega)$ 对损失的信号能量进行了补偿, 提高了接收端的信号功率。

此外, 为研究上述模型下的 PRBS 码通信质量, 将 (8) 式代入通用开关键控 (OOK) 调制下的 BER 模型中^[16], 则可推导出补偿后的 BER 模型为

$$R_{\text{BER}} = 0.25 \int_{\chi} \text{erfc}\left(\frac{\chi + C_j G_j / 2}{\sqrt{2} \sigma_n}\right) f_{\chi}(\chi) d\chi + 0.25 \int_{\chi} \text{erfc}\left(\frac{-\chi + C_j G_j / 2}{\sqrt{2} \sigma_n}\right) f_{\chi}(\chi) d\chi, \quad (16)$$

式中 C_j 为 j 时刻激光脉冲的响应幅度, G_j 为 j 时刻补偿函数的幅度, $f_{\chi}(\chi)$ 为串扰量 χ 的概率密度函数, 信噪比 $R_{\text{SNR}} = C_j G_j / \sigma_n$, $\text{erfc}(\cdot)$ 为余弦误差函数。对上述模型进行数值仿真, 如图 2 所示。由图可知, 对上述模型使用信道补偿算法后, 可以改善大气信道引起的 ISI, 在相同的 SNR 下, 系统 BER 得到显著改善。

3 野外实验

根据以上传输模型的分析, 本课题组于在 2016 年

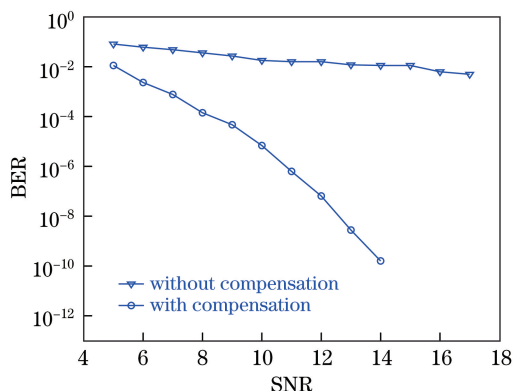


图 2 BER 仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of bit error rate

8月进行了相关实验,据吉林省环保厅官方数据显示,当时的细颗粒物(PM_{2.5})的月平均质量浓度为22 μg/m³,且大气信道经过湖泊区域时伴有水雾现象发生。为体现补偿算法的最好性能并避免背景光的影响,选择实验时间为2016年8月5日至30日1:00—5:00。实验过程中,首先由任意波形发生器(AWG, Keysight M8190型)作为信号源产生100 MHz的矩形脉冲电信号,其码元速率为200 MBaud。采用OOK的调制方式驱动波长为808 nm的半导体激光器产生矩形脉冲光波信号,激光光束通过发射端

光束准直扩束系统的扩束后,压缩束散角进入大气信道,光束准直扩束系统下端安置了三维电动调整台,实现对发射端高度、俯仰角和转角的高精度调整,如图3(a)所示。图3(b)为相距6.2 km的大气信道,其中发射端位于长春理工大学科技大厦13层,接收端位于长春市中山花园小区一栋高楼的17层。在接收端,采用Dall-Kirkham望远系统对入射光进行接收并将其整形为平行光,利用透镜将输出光束会聚到带宽为1~1600 MHz的雪崩光电二极管(APD)探测器(THORLABS APD210型)上,然后通过型号为Keysight MSOS404A的示波器以1 GSa/s的采样速率对光束进行采集并储存数据,如图3(c)所示。为了模拟真实的通信码流环境,在Matlab中采用曼切斯特编码形式生成7阶PRBS码数据^[17],并用AWG生成码元速率为200 MBaud的电信号,利用电信号驱动半导体激光器产生光脉冲信号,并进行PRBS码传输实验,在接收端同样以1 GSa/s的采样速率对光束进行采集。最后,在现场可编程门阵列(FPGA)编译软件环境(ISE)下按照第2.2节所述原理编写信道补偿算法程序,在硬件仿真软件modelsim中对采集的数据进行仿真,在Matlab中分析仿真结果,如图4所示。

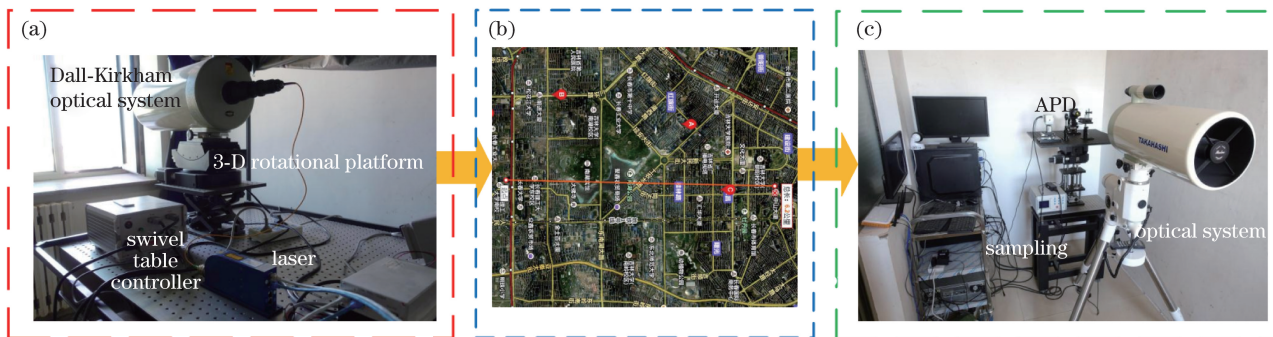


图 3 野外激光传输实验。(a)发射端;(b)大气信道;(c)接收端

Fig. 3 Field laser transmission experiment. (a) Transmitting terminal; (b) atmosphere channel; (c) receiving terminal

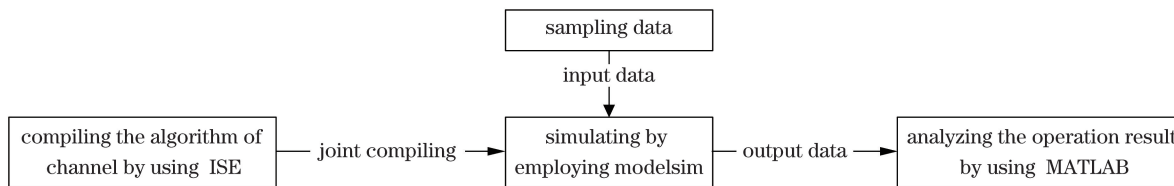


图 4 实验数据处理流程

Fig. 4 Processing flow for experimental data

4 实验结果分析与讨论

为分析在FPGA上的运算性能,按照如图4所示的流程在ISE和modelsim软件中对采集的数据

进行仿真,对数据进行处理后得到表1和图5。其中,表1中LUT表示查找表,为Xilinx公司FPGA内部的最小单元;LUT-FF表示FPGA的基本单元;IOBs为输入输出缓冲系统的基本单元;BUFG/

BUFGCTRLs 表示全局时钟资源的基本单元。实验过程中选择 xc7vx330t-2ffg1157 芯片,并采用两路并行处理,每一路的处理速度为 500 MHz,满足示波器采样速率为 1 GSa/s 的要求。在 Xilinx 集成的 ISE 上编译算法时,实验硬件耗费资源低于 10%,如表 1 所示,这表明该算法的硬件结构不复杂且易实现,满足硬件设计的要求,其硬件结构如图 5(a)所示。为分析运算速度和计算精度,利用

Matlab 对 modelsim 仿真的数据进行分析,其仿真过程如图 5(b)所示。当抽头系数 w 的个数达到 9 以上时,总体均方误差逐步趋于稳定,表明该补偿算法符合实验数据的处理要求,如图 5(c)所示。从图 5(d)可以看出,当 w 的个数为 11 时, $E[e_j^2]$ 稳定保持在 0.03 左右,表明该信道补偿算法的误差小且稳定,可在 FPGA 上实现。为运算方便,后文 w 的个数取值均为 11。

表 1 FPGA 内部资源利用统计

Table 1 Statistics of FPGA internal resource utilization

Target device logic utilization	xc7vx330t-2ffg1157 used	ISE 14.7 available	Number of w is 11 utilization
Number of slice registers	307	408000	0
Number of slice LUTs	2068	204000	1%
Number of fully used LUT-FF pairs	83	2292	3%
Number of bonded IOBs	50	600	8%
Number of BUFG/BUFGCTRLs	2	32	6%

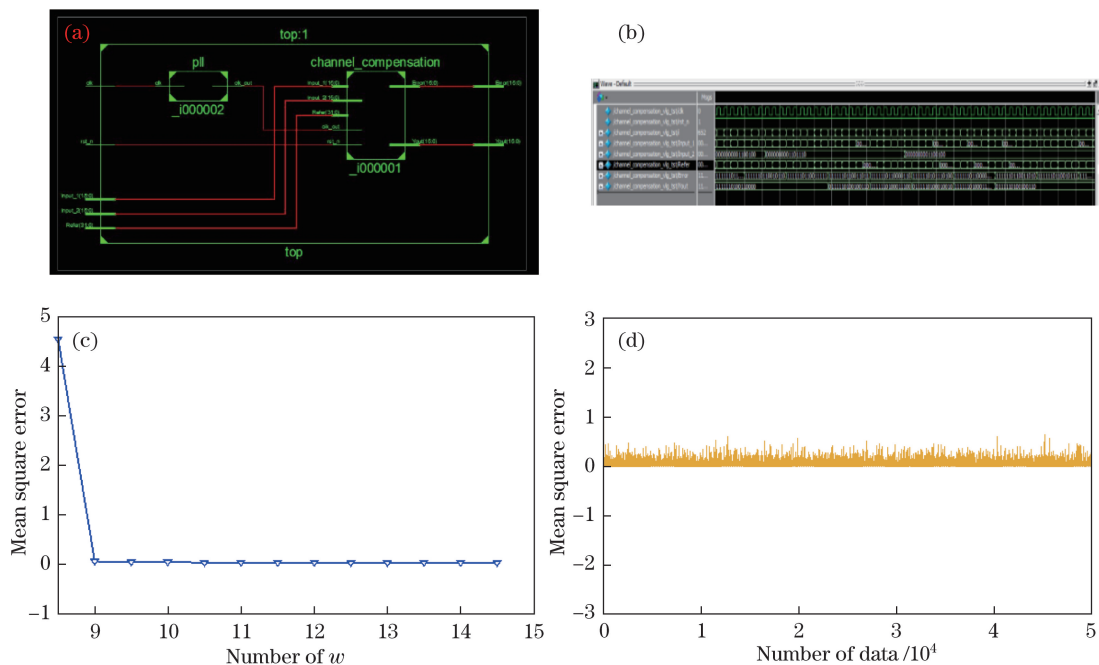


图 5 ISE 和 modelsim 联合仿真。(a) ISE 仿真的寄存器传输级原理图;(b) modelsim 仿真结果;
(c) w 的个数与均方误差的关系;(d)实时数据的均方误差

Fig. 5 Co-simulation of ISE and modelsim. (a) Register-transfer level schematic of ISE simulation;
(b) result of modelsim simulation; (c) relationship between number of w and mean square error;
(d) mean square error of real-time data

图 6 为对时域矩形脉冲信号进行硬件仿真后平均计算得到的波形,菱形表示平均采样数据,实线为拟合曲线且表示波形的包络,其中采集的数据容量为 6.4×10^9 。从图 6 可以得到,在发射端对一个周期为 10 ns 的矩形脉冲采样 10 次,其中 2~8 ns 范围内的归一化脉冲强度大于 0.95,0~2 ns 和 8~10 ns 范围内的归一化脉冲强度低于

0.08,如图 6(b)所示。对比图 6(a)、(b)可以看出,接收端的波形几乎没有失真。当 100 MHz 矩形脉冲信号经过大气信道后,时域波形发生了畸变,且脉冲强度在 0~6 ns 范围内不断上升,而在 6~10 ns 范围内快速回落。相比于图 6(b),图 6(c)中 0~6 ns 范围为矩形脉冲的上升沿,而 6~10 ns 范围为下降沿。从整个脉冲采样数据的幅度包络来

看,图 6(c)接收的光脉冲出现了明显的畸变。对比图 6(b)、(c)可以看出,100 MHz 矩形光脉冲信号经过大气信道后,脉冲的畸变程度约为 2.7 ns 时隙,这表明野外实验结果比较符合第 2.1 节中模型

的模拟结果,说明该模型有效。图 6(d)中有 5 个数据接近于 0,且波形包络与理论测量值相近,说明补偿算法在时域有效地抑制了脉冲畸变,抵消了大气信道所带来的影响。

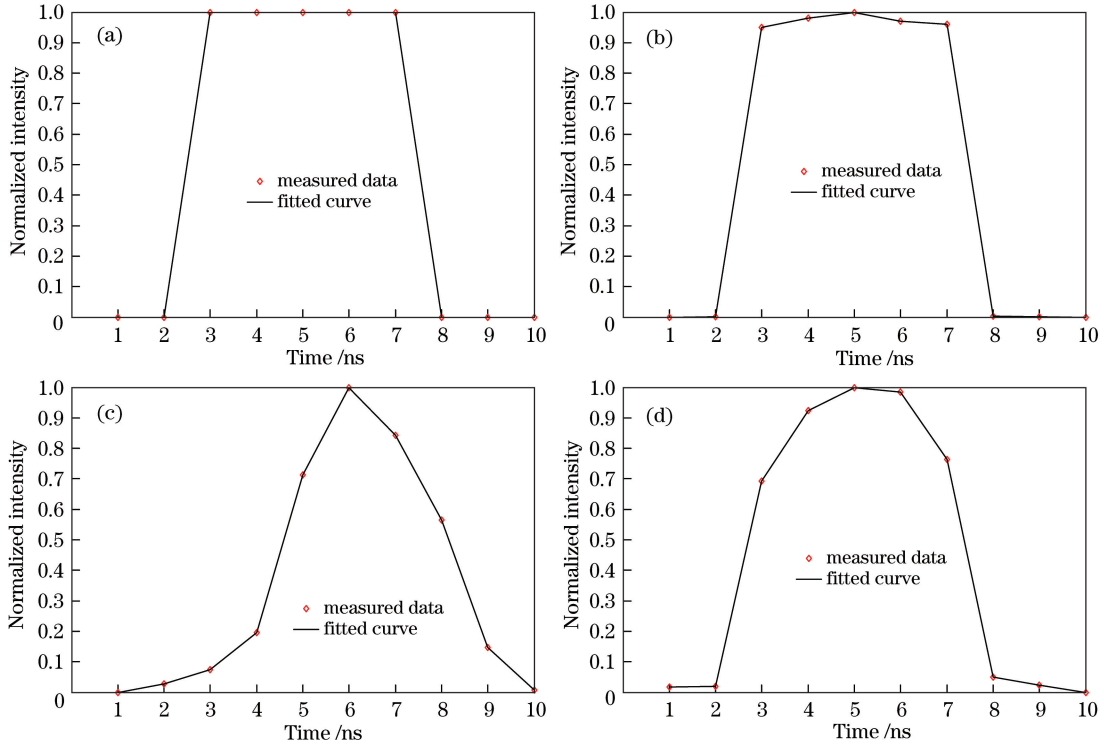


图 6 接收光脉冲强度的平均时间波形。(a)理论模拟的 100 MHz 矩形脉冲的时间波形;(b)发射端的平均时间波形;
(c)矩形脉冲激光信号经过大气后的平均时间波形;(d)运用信道补偿算法后的平均时间波形

Fig. 6 Average time waveform of received light pulse intensity. (a) Time waveform of simulated 100 MHz rectangular pulse;
(b) average time waveform of transmitting terminal; (c) average time waveform of rectangular pulse laser signal after passing through atmosphere; (d) average time waveform after using channel compensation algorithm

图 7 是对时域波形(图 6)进行快速傅里叶变换后的波形包络。100 MHz 矩形脉冲信号的能量集中在主瓣内(0~100 MHz),其中旁瓣内(100~200 MHz)高频分量丰富,如图 7(b)所示。分析图 7(a)可知,接收端系统的传递函数几乎没有变化,即可以认为 $H_r(j\omega) \approx 1$, $H_t(j\omega) \approx 1$ 。对于图 7(c)而言,光信号经过大气信道后,频谱衰减严重,在 135 MHz 以后的旁瓣频谱衰减程度增加。数据表明,大于 430 MHz 的高频分量基本消失,说明大气信道对信号产生了抑制作用,特别是对高次谐波的抑制效果更加明显。由图 7(c)可知,整个大气信道的传递函数 H_c 发生了畸变, H_c 由一个全通滤波器变成了低通滤波器,抑制了高频信号,这也是光脉冲信号发生展宽的主要原因。补偿后的信号波形如图 7(d)所示,其主瓣所在频率范围为 0~115 MHz,大部分频率信息被保留。在整个通频带中,图 7(d)相对于图 7(c),带宽有了明显拓宽,分析数据发现,

补偿后的系统将带宽扩展至 0.84 GHz,其原理符合(14)式。因此得出一个结论:引入的信道补偿传递函数 $G(j\omega)$ 对大气信道所引起的信号畸变有明显的抑制作用,在频域上相当于补偿了光脉冲高频信号,将系统的整体带宽提高了 1.95 倍左右。

为了进一步研究矩形脉冲通过大气信道后的功率特性,对其进行功率谱分析,如图 8 所示,其中虚线表示脉冲信号功率在 0~170 MHz 频率范围的衰减趋势。发射端的矩形脉冲信号的功率[图 8(b)]相对于理论模拟的信号功率[图 8(a)]的变化程度非常小,几乎可以忽略不计。经过大气信道后,矩形脉冲信号的功率在 0~170 MHz 内的衰减约为 25 dB,频率大于 200 MHz 的高频信号的能量衰减程度迅速增加,如图 8(c)所示,这表明大气信道是个抑制高频信号的衰减系统。通过分析图 8(d)可以发现,其包络接近接收端的光脉冲功率谱[图 8(b)],说明信道补偿算法实际是对矩形光脉冲能量进行了

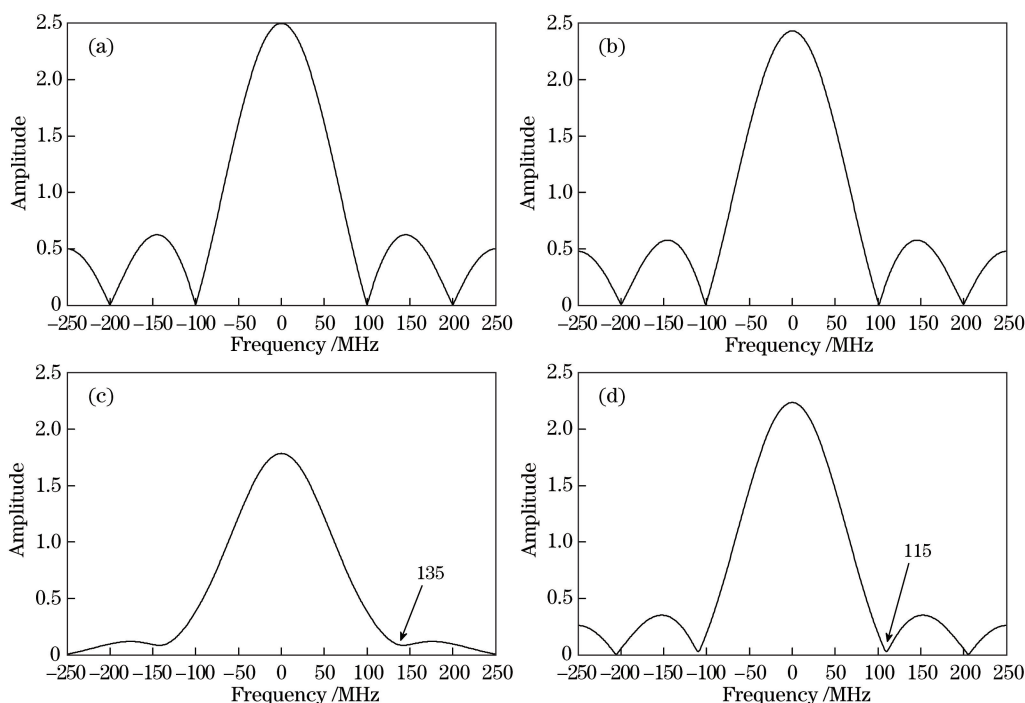


图 7 接收光脉冲强度的频域波形包络。(a)理论模拟的 100 MHz 矩形脉冲的频域波形包络;(b)发射端的频域波形包络;
(c)矩形脉冲激光信号经过大气后的频域波形包络;(d)运用信道补偿算法后的频域波形包络

Fig. 7 Frequency-domain envelope of received light pulse intensity. (a) Frequency-domain envelope of simulated 100 MHz rectangular pulse; (b) frequency-domain envelope of transmitting terminal; (c) frequency-domain envelope of rectangular pulse laser signal after passing through atmosphere; (d) frequency-domain envelope after using channel compensation algorithm

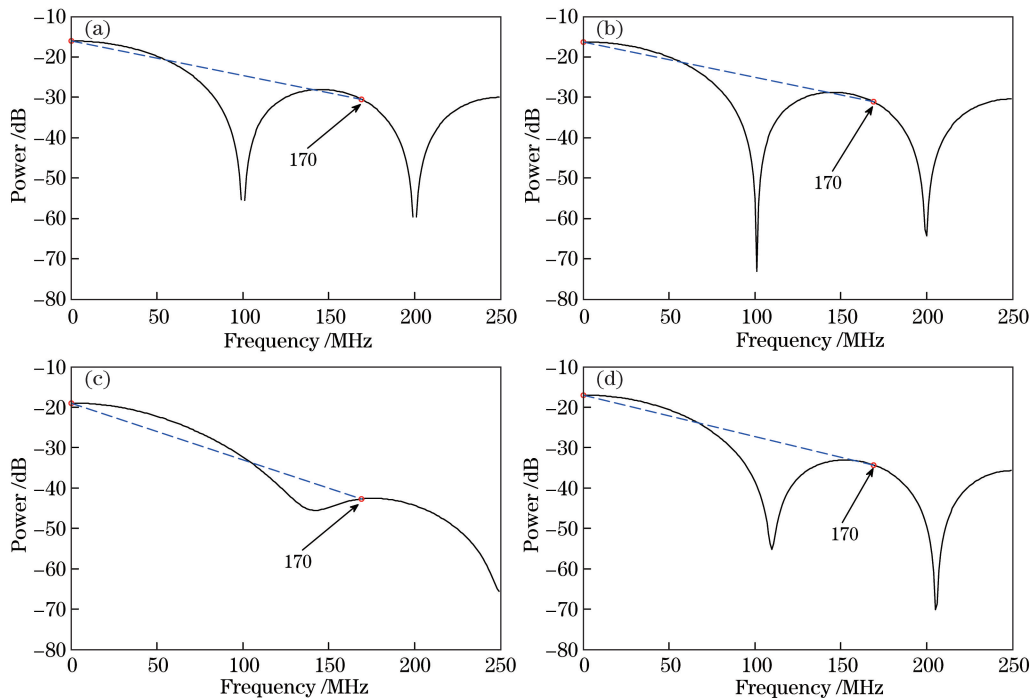


图 8 接收光脉冲的功率谱包络。(a)理论模拟的 100 MHz 矩形脉冲的功率谱包络;(b)发射端的功率谱包络;
(c)矩形脉冲激光信号经过大气后功率谱包络;(d)运用信道补偿算法后的功率谱包络

Fig. 8 Power spectrum envelope of received light pulse. (a) Power spectrum envelope of simulated 100 MHz rectangular pulse; (b) power spectrum envelope of transmitting terminal; (c) power spectrum envelope of rectangular pulse laser signal after passing through atmosphere; (d) power spectrum envelope after using channel compensation algorithm

补偿,即提高了 SNR。分析实验数据发现,SNR 提高了 5 倍,如(15)式所述。因此,运用该补偿算法可提高 FSO 系统的 SNR,进而提高通信质量。

图 9 为野外实验 BER 统计图。在 PRBS 激光传输实验过程中,因为采用的是 Manchester 编码形式^[17],即在光波上载有的 0 和 1 是等概率分布的,光波经过大气信道后发生了 ISI,如图 9 所示。图 9(a)为 OSNR 为 10 dB 时不同样本的 BER 统计图,图 9(b)为激光信号经过大气信道的判决概率,图 9(c)为运用补偿算法后的判决概率。由图 9 可

知,对于第 10 个样本,当 PRBS 码在大气信道中传输时,落在判决域 0 以下的概率为 0.72369,即表明信道中存在严重的码间串扰,严重影响了正常通信。运用补偿算法后,PRBS 码落在 0 以上的概率为 0.49993,落在 0 以下的概率为 0.50007,此时的 BER 为 10^{-6} 左右,降低了 3 个量级以上,优于文献[18]中的结果,表明该信道补偿算法有效。由此可以得出,采用本文算法对大气信道进行补偿有利于降低 ISI,在同等 OSNR 条件下,BER 降低了 3 个量级以上。

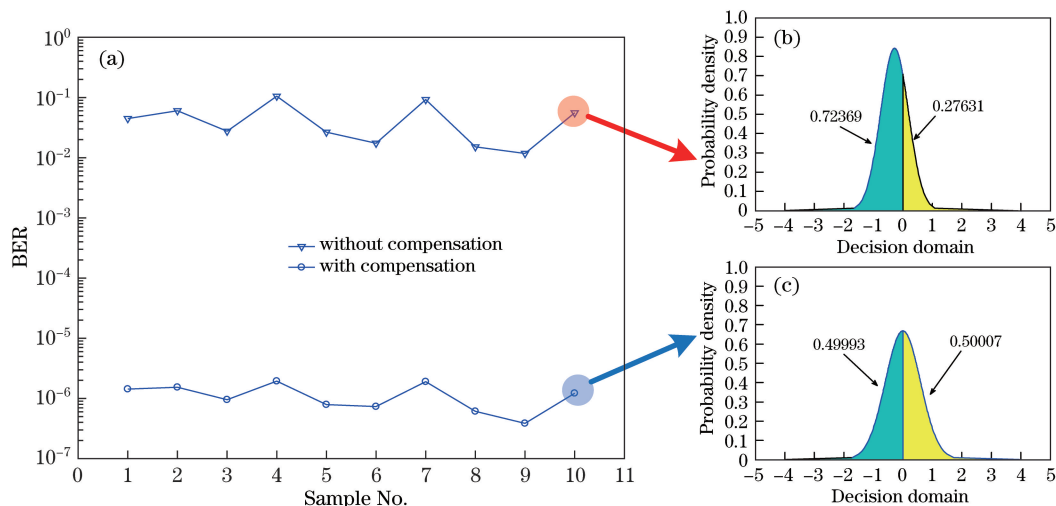


图 9 野外实验 BER 统计图。(a) BER 样本统计图;(b) 未经过补偿算法时的第 10 个样本数的判决概率;
(c) 经过补偿算法时的第 10 个样本数的判决概率,其中第 10 个样本数为 1.4×10^7

Fig. 9 Bit error rate statistic chart of field experiments. (a) BER sample statistic chart; (b) judgment probability of the 10th sample number without compensation; (c) judgment probability of the 10th sample number with compensation, where the 10th sample number is 1.4×10^7

5 结 论

为研究矩形激光脉冲在大气中的传输特性,设计了矩形脉冲激光信号在大气中的传输实验,并提出了针对激光脉冲传输实验的大气信道补偿算法。首先,从系统的时域和频域角度论述了矩形脉冲激光信号在大气信道中传输的原理,基于此提出了大气信道补偿算法。然后,在相距 6.2 km 的两栋高楼之间相继开展了 100 MHz 矩形脉冲野外激光实验和码元速率为 200 MBaud 的 PRBS 码传输实验。最后,分析了接收端光脉冲时域、频域和功率谱的特性,并在硬件设计仿真软件 ISE 和 modelsim 上验证了算法的有效性。实验结果表明:100 MHz 矩形光脉冲经过大气信道后发生了畸变,在频域上表现为大于或等于 430 MHz 的旁瓣峰,当光脉冲传输到接收端后旁瓣峰基本消失,表明大气信道是一个低通系统,对高频信号进行了抑制。此外,在硬件编译

软件上进行的信道补偿算法仿真表明:运用该算法后,矩形光脉冲畸变在时域上得到抑制且脉冲宽度保持在 5 ns 左右,整个系统的带宽得到拓宽,此时系统可以传输小于或等于 0.84 GHz 的信号,信号的 SNR 提高了 5 倍左右。在进行 PRBS 码传输实验时,当 OSNR 为 10 dB 时,运用信道补偿算法后 BER 至少降低了 3 个量级,提高了激光通信质量。所建立的矩形脉冲在大气信道中的传输模型可以为激光的通信链路设计与分析提供参考,所提出的大气信道补偿算法为后续信号处理提供借鉴,具有应用价值。

参 考 文 献

- [1] Jing X, Wu Y, Hou Z H, *et al.* Study of irradiance fluctuations for laser beam propagation in atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3110-3116.
靖旭, 吴毅, 侯再红, 等. 湍流大气中激光传输光强

- 起伏特征研究[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3110-3116.
- [2] Chen C, Yang H, Lou Y, *et al.* Effects of annular-aperture receiver on angle-of-arrival fluctuations of planewaves[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1731-1733.
- [3] Chen C, Yang H, Tong S, *et al.* Spatiotemporal coherence properties of broadband Gaussian Schell-model beams propagating through atmospheric turbulence[J]. Applied Physics B, 2013, 111(3): 373-381.
- [4] Ke X Z, Zhang H J. Study on broadening characteristics of partially coherent Gaussian pulse in atmospheric turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080603.
柯熙政, 张焕杰. 部分相干高斯脉冲在大气湍流中展宽特性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080603.
- [5] Zhao G H, Zhao S H, Yao Z S, *et al.* Effect of the pulse broadening caused by atmosphere on satellite based quantum key distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1127001.
赵顾颖, 赵尚弘, 么周石, 等. 大气导致的脉冲展宽对星载量子密钥分发的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1127001.
- [6] Wang J, Yu X. The research of pulse stretch in free-space optical communication[J]. Optical Technique, 2009, 35(1): 80-83.
王佳, 俞信. 自由空间光通信系统中光脉冲展宽问题的研究[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 80-83.
- [7] Zhang Y F, Sun X Q. Analysis of ultrashort pulse waveform and broadening caused by atmospheric turbulence and dispersion[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(2): 267-270.
张玉发, 孙晓泉. 超短脉冲大气传输展宽及脉冲波形分析[J]. 半导体光电, 2015, 36(2): 267-270.
- [8] Hajjarian Z, Kavehrad M, Fadlullah J. Analysis of wireless optical communications feasibility in presence of clouds using Markov chains[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1526-1534.
- [9] Arnon S, Sadot D, Kopeika N S. Analysis of optical pulse distortion through clouds for satellite to earth adaptive optical communication[J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(8): 1591-1605.
- [10] Young C Y, Andrews L C, Ishimaru A. Time-of-arrival fluctuations of a space-time Gaussian pulse in weak optical turbulence: An analytic solution[J]. Applied Optics, 1998, 37(33): 7655-7660.
- [11] Ishimaru S A. Beam wave two-frequency mutual coherence function and pulse propagation in random media: An analytic solution[J]. Applied Optics, 1979, 18(10): 1613-1618.
- [12] Osche G R. Optical detection theory for laser applications[M]. New York: Wiley-Interscience, 2002.
- [13] Juradonavas A, Garridobalsells J M, Castillovazquez M, *et al.* Numerical model for the temporal broadening of optical pulses propagating through weak atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3662-3664.
- [14] Klapper J, Harris M. On the response and approximation of Gaussian filters[J]. IRE Transactions on Audio, 1959, 7: 80-87.
- [15] Hsu H P, Ranjan R. Signals and systems[M]. Boston: McGraw-Hill Education, 2014: 148-160.
- [16] Lee S, Hamzeh B, Kavehrad M. Airborne laser communications and performance enhancement by compensation[C]. SPIE, 2006, 6105: 61050P.
- [17] Kim B K, Park H, Park S, *et al.* Optical access network scheme with downstream Manchester coding and upstream NRZ remodulation[J]. Electronics Letters, 2006, 42(8): 484-485.
- [18] Ren Y, Wang Z, Xie G, *et al.* Demonstration of OAM-based MIMO FSO link using spatial diversity and MIMO compensation for turbulence mitigation[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2016: 16227065.