

基于相位调制光链路的光纤长度测量系统

叶全意 杨 春

(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要 介绍了一种基于相位调制干涉仪解调光链路的新颖光纤长度测量系统。推导了光链路增益理论模型, 分析了光纤干涉仪的两臂光程差和增益自由频谱范围(FSR)的关系, 得出利用长度已标定光纤来计算待测光纤长度的方法。该测量方法和传统的光时域反射(OTDR)方法相比, 无测量盲区且可以将测量精度由米量级提高到毫米量级; 与光频域反射法(OFDR)和光相干域反射法(OCDR)相比, 对光源的相干性要求显著降低。通过理论分析和实验验证, 采用现有的 67 GHz 安捷伦网络分析仪可以测试的光纤最小相对长度为 3 mm, 在相对光纤长度 100 m 的情况下, 测量误差小于 0.05 mm。该系统的原理及结构都很简单, 是一种具有实用价值的光纤长度测量方法。

关键词 光纤光学; 相位调制光链路; 光纤长度; 增益; 自由频谱范围

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0505003

Fiber Length Measurement System Based on Phase Modulation Optical Link

Ye Quanyi Yang Chun

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract Based on phase modulation optical link, a novel fiber length measurement system is proposed. The theory model of gain of optical link is derived. By analyzing the relationship between the free spectral range of gain of the optical link and the optical path difference of the fiber interferometer, the fiber length is acquired. Compared with the traditional time domain reflectometry (OTDR), this system has no dead zone, and improves the precision from meter to millimeter. Compared with optical frequency domain reflectometry (OFDR) and optical coherence domain reflectometry (OCDR), this system does not need costly and high-performance laser to ensure coherence. The feasibility of the system is analyzed in theory, and is verified by experiments. It is shown that the smallest measurable relative length of fiber is 3 mm with the existing 67 GHz vector network analyzer, and the error can be controlled within 0.05 mm when the relative length of fiber is 100 m. This system is characterized by simple structure, easy operation and higher practical value.

Key words fiber optics; phase modulation optical link; fiber length; gain; free spectral range

OCIS codes 060.4510; 060.2330; 060.2360; 120.5060

1 引言

目前, 光纤通信已得到广泛的应用。高速多通道光传输系统、有线电视(CATV)系统、相控阵雷达空间扫描系统、相位噪声测试系统以及高能粒子光能转化的收集等方面都使用多条光纤进行信号传输^[1~3]。高速并行光互连系统对通道间的歪斜有要求, 需要保证精确控制各通道光纤长度的一致性。

光控相控阵天线的波束控制系统, 需要将延时光纤的长度误差控制在毫米量级。另外, 在一些高精度光干涉仪器中, 对光纤的长度精度也有很高的要求, 光纤之间一旦产生相对时延, 信号将由于时延而失真或减弱^[4,5]。因此, 光纤长度的精确测量是光纤通信、光学仪器和系统中需要应用的一项重要技术^[6,7]。

收稿日期: 2013-01-04; **收到修改稿日期**: 2013-01-28

基金项目: 国防重点项目资助课题。

作者简介: 叶全意(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事微波光子学和光通讯等方面的研究。E-mail: fjnuyqy@163.com

导师简介: 杨 春(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光速光通信、微波光子学和太赫兹等方面的研究。

E-mail: yangchun_seu@163.com(通信联系人)

目前的光纤长度测量方法主要包括光时域反射法(OTDR)、光频域反射法(OFDR)和光相干域反射法(OCDR)。OTDR 基于背向瑞利散射和菲涅耳反射理论,测试范围最高可达上百公里,精确度可以达到米量级^[8~10];OFDR 动态范围大且测量精度可以达到毫米量级,但是由于要保证相干性,对激光光源有着严格的要求;OCDR 测量精度甚至可以达到 10 μm量级,但不适用于长光纤的测量^[11~13]。近年又提出了将待测光纤构成干涉仪来测量长度的方法,可以实现无盲区的长度测量,该方法的测量精度和 OTDR 方法接近^[14~17]。因此,简便而高精度的光纤长度测量方法仍然值得研究。

相位调制干涉解调模拟光链路具有高的线性、不需要偏置电压、高效率和大增益等优点,近年得到了广泛研究^[18,19]。本文提出了一种利用相位调制光链路来精确测量光纤长度的新方法。建立了相位调制光链路理论模型,得到光链路的自由频谱范围(FSR)和链路解调干涉仪两臂光程差的关系。这种方法通过分析微波光链路增益的自由频谱范围来测

量光纤的长度,频谱分辨率可以达到 1 Hz。由于网络分析仪的频率分辨率为赫兹量级,大大高于光谱分析仪的频率分辨率(GHz),因此测量的精确度可以提高好几个数量级。理论上采用现有的 67 GHz 网络分析仪可以测试的光纤最小相对长度为 3 mm。这种方法原理及结构都很简单,是一种具有实用价值的方法。

2 系统理论分析

基于相位调制干涉仪解调微波光链路的光纤长度测量系统如图 1 所示。单音微波信号(RF)经过相位调制器(PM)对激光器出射的连续光载波进行相位调制。已调制光信号由 3 dB 光纤耦合器 A 分为两路,其中一路经过长度已标定的参考光纤,另外一路经过待测光纤。再经过 3 dB 耦合器 B 合波后输出。最后由光电探测器转换为微波信号并输入网络分析仪。光链路的幅频特性由网络分析仪扫描并记录其 S21 增益曲线,得到增益曲线的自由频谱范围,从而确定被测光纤相对长度。

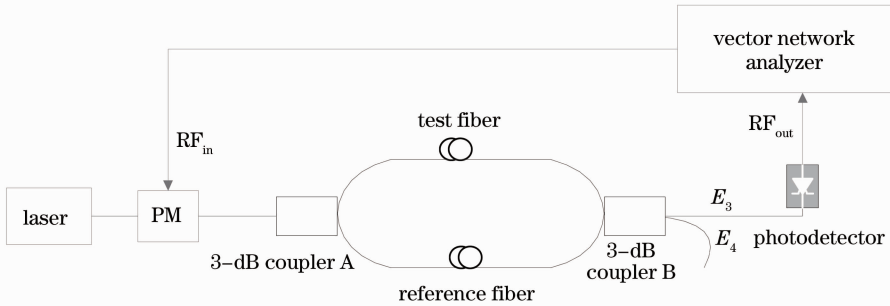


图 1 光纤长度测量系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber length measurement system

设激光器输出的光载波表示为

$$E_{in} = \sqrt{2\eta P_{in}} \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

式中 P_{in} 为激光器输出功率, ω_0 为光载波的角频率, η 为光纤的波阻抗, t 为时间。假设两个耦合器均为理想的 3 dB 耦合器,联系其传输矩阵,则耦合器 B 输出端的场强 $E_3(t)$ 、 $E_4(t)$ 为^[20]

$$\begin{bmatrix} E_3(t) \\ E_4(t) \end{bmatrix} = \sqrt{a} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma(\tau) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \times \exp[i\phi(t)] \begin{bmatrix} E_{in}(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\phi(t) = \pi V_{RF} \cos(\omega_{RF} t) / V_{\pi}$ 是调制电压对应的相位调制角,其中 V_{RF} 、 ω_{RF} 分别为调制信号的峰值电压和频率, V_{π} 为相位调制器的半波电压。 a 为光链路的总损耗, $\tau = n\Delta L / c$ 为待测光纤与参考光纤的

光延迟差, ΔL 为测试光纤与参考光纤的相对长度, n 为光纤色散, c 为光速, Γ 为伽马函数。

在单输出情况下,选择 $E_3(t)$ 为探测器的输入。光探测器接收到的光功率为

$$P_{opt}(t) = \frac{a}{2} P_{in} \{1 + \sin[2\phi(t - \tau) - 2\phi(t)]\}, \quad (3)$$

所以对应的光电流为

$$I(t) = I_{dc} \{1 + \sin[2\phi(t - \tau) - 2\phi(t)]\}, \quad (4)$$

式中 $I_{dc} = a\mathcal{R}P_{in}/2$ 为光探测器的直流(DC)电流, \mathcal{R} 为光探测器的响应度,单位为 $A \cdot W^{-1}$ 。则在正交偏置下,将 $\phi(t) = \pi V_{RF} \cos(\omega_{RF} t) / V_{\pi}$ 代入(4)式,把光电探测器的输出光电流按一类贝塞尔函数展开

$$I_{\text{RF}} = I_{\text{dc}} \left\{ \left\{ -2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) \cos[(2n-1)\omega_{\text{RF}}(t-\tau)] \right\} \left\{ J_0 \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) \cos[(2n)\omega_{\text{RF}}(t)] \right\} - \left\{ J_0 \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) \cos[(2n)\omega_{\text{RF}}(t-\tau)] \right\} \left\{ -2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) \cos[(2n-1)\omega_{\text{RF}}(t)] \right\} \right\}. \quad (5)$$

由(5)式可看出探测器输出光电流可分解为基波及各次谐波频率分量。在小信号($V_{\text{RF}} \ll V_{\pi}$)模型下,二阶及以上贝塞尔函数的数值相对较小,所以输出光电流的一阶贝塞尔函数近似值可表示为

$$I_{\text{RF}} = 4I_{\text{dc}} J_0 \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) J_1 \left(\frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\tau}{2} \omega_{\text{RF}} \right). \quad (6)$$

在小信号($V_{\text{RF}} \ll V_{\pi}$)情况下,由贝塞尔函数的性质 $J_0(x) \approx 1$, $J_1(x) = x/2$, 所以输出功率 $P_{\text{RF_out}} = 2I_{\text{dc}}^2 (\pi V_{\text{RF}}/V_{\pi})^2 \sin^2(\omega_{\text{RF}}\tau/2) Z_{\text{out}}$, 且微波输入功率为 $P_{\text{RF_in}} = V_{\text{RF}}^2/(2Z_{\text{in}})$, Z_{in} , Z_{out} 分别为输入、输出阻抗,所以一阶小信号增益为

$$G = \frac{P_{\text{RF_out}}}{P_{\text{RF_in}}} = \frac{4I_{\text{dc}}^2 \pi^2 Z_{\text{in}} Z_{\text{out}}}{V_{\pi}^2} \sin^2 \left(\frac{\tau}{2} \omega_{\text{RF}} \right). \quad (7)$$

由(7)式可以看出,一阶小信号增益和 $\sin^2(\omega_{\text{RF}}\tau/2)$ 存在正比关系,当 $\sin^2(\omega_{\text{RF}}\tau/2)$ 取最大值等于1时,增益达到峰值;当 $\sin^2(\omega_{\text{RF}}\tau/2) = 0$ 时,增益系数为最小值。设 f_k 是第 k 个达到增益峰值的调制频率,则

$$f_k = \frac{1}{2 \times \tau} + k \times \frac{1}{\tau}, \quad k = 0, 1, 3 \dots, 2N+1, \quad (8)$$

所以增益的自由频谱范围 $R_{\text{FS}} = 1/\tau$ 。如图2所示,当延迟时间分别为400、100、25 ps时,其对应的自由频谱范围分别为2.5、10、40 GHz。

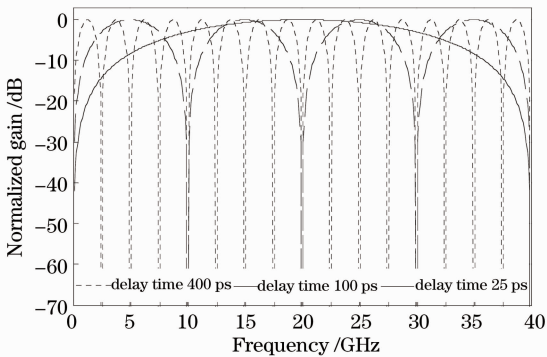


图2 不同延迟时间下归一化增益和调制信号频率的关系

Fig. 2 Relationship between the gains and the frequencies at different delay times

根据增益自由频谱范围,可以计算出测试光纤与参考光纤的相对长度 ΔL ,即

$$\Delta L = \frac{c\tau}{n} = \frac{c}{n \times R_{\text{FS}}}. \quad (9)$$

因此如果已知光纤的有效折射率和此时自由频谱频率范围,便可计算出光纤的相对长度。再根据准确测量长度参考光纤的长度 L_0 ,就可以计算待测光纤长度 L ,即

$$L = \frac{c}{n \times R_{\text{FS}}} + L_0. \quad (10)$$

在(10)式中,由于参考光纤的长度 L_0 ,光纤色散 n ,光速 c 都为已知常数,所以光纤的长度只和自由光谱范围 R_{FS} 有关。

3 实验分析

根据以上分析,搭建如图1所示实验系统。本实验采用分布反馈式(DFB)半导体激光器(Ortel公司1772-50-CC-FP)提供1550 nm光载波信号,网络分析仪提供的调制信号通过相位调制器(Thorlabs公司LN53-10-P-A-A-STL)调制到光载波上。被耦合器A分为两路的已调制信号分别通过待测光纤和参考光纤后耦合入耦合器B,再通过光电探测器(Discovery Semiconductor公司DSC40S-39-FC/APC-K-1)转换为电信号并输入网络分析仪。

为了保证小信号增益曲线,调制信号的输入功率为-5 dBm。激光器输出功率为10 dBm,链路总损耗 a 为5 dB。图3是用网络分析仪测试得到的0~25 GHz的S21增益曲线参数。由图中可以看出,两条曲线的增益存在固定周期,并且增益峰值都随调制信号频率下降,这是由于受相位调制器和探

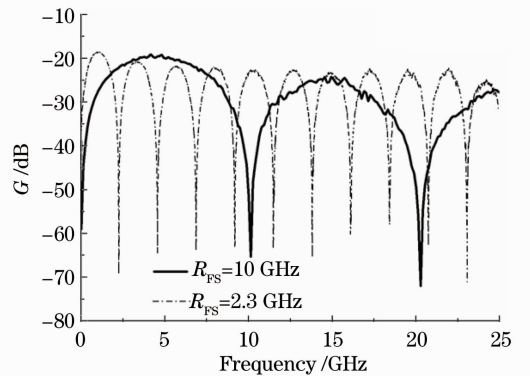


图3 测量的增益曲线,其自由频谱范围分别为10 GHz和2.3 GHz

Fig. 3 Curves of link gains while the free spectral ranges are 10 GHz and 2.3 GHz

测频率响应的影响。实线的 S21 增益在微波信号频率为 5、15、25 GHz 时达到最高值,对应的增益峰值分别为 -20.5 dB、-25 dB 和 -31 dB,其增益自由频谱范围为 10 GHz,根据(10)式可得相对光纤长度为 0.02 m。虚线表示 S21 增益参数在频率为 1.15、3.45 GHz 等处 S21 增益达到峰值,其对应的自由频谱范围为 2.3 GHz,同样根据(10)式可计算得虚线对应的相对光纤长度为 0.087 m。

为了比较光纤长度测量系统的准确性,使用光延迟线作为待测光纤。设置不同的光延迟时间,测量对应的自由频谱范围再根据(9)式来计算光程差。图 4 是光程差和自由频谱范围的理论和测量值,实线是理论仿真曲线,圆点是实际测量的结果。光纤相对长度和自由频谱范围呈反比关系,当 S21 增益曲线的自由频谱范围为 10 GHz 时,光纤相对长度为 0.02 m;当 S21 增益曲线的自由频谱范围降低为 1 GHz 时,对应光纤相对长度为 0.2 m。所以根据(9)式,系统使用现有的 67 GHz 扫频范围的网络分析仪,能测量的最小光纤相对长度为 3 mm。也就是说不考虑光纤的损耗时,它所能测量的动态范围大,从 3 mm 到无穷大的光纤长度都可以测量。实际能测量的最大光纤长度将由于光纤链路的损耗而有所减小,可以通过加入掺铒光纤放大器(EDFA)来进行补偿。

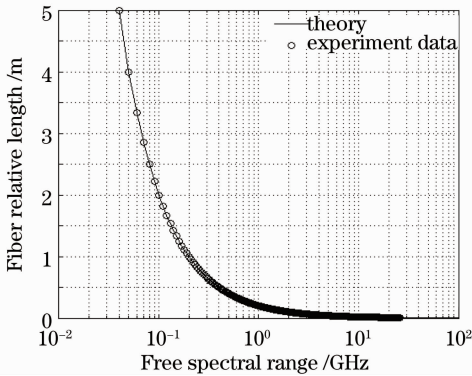


图 4 光纤相对长度和自由频谱范围的理论和实验值

Fig. 4 Measured and calculated fiber relative length versus free spectral range

根据(10)式,系统的误差主要来源于参考光纤长度 L_0 的确定和 R_{FS} 的测量。对于前者,可以很容易地通过精确测量达到减小误差的目的。对于后者,网络分析仪造成的光纤测量系统的误差为

$$\frac{d(\Delta L)}{d(R_{FS})} = \frac{c}{n \times R_{FS}^2} \quad (11)$$

由于目前商用网络分析仪的分辨率高达 1 Hz,所以 $d(R_{FS}) \leq 1$ Hz,从而结合(9)式得到由于测量

仪器造成的误差为

$$d(\Delta L) = \frac{\Delta L^2 \times n}{c} \cdot d(R_{FS}) \leq \frac{\Delta L^2 \times n}{c} \cdot d(R_{FS}) \leq 1 \text{ Hz} \quad (12)$$

可见,测量误差直接受到待测光纤与参考光纤的相对长度 ΔL 的影响,并存在平方的关系。在相对光纤长度为 100 m、频率分辨率为 1 Hz 的情况下,长度测量误差能控制在 0.05 mm 以内。因此选择合适的参考光纤很重要。此外,目前商用 DFB 激光器的相干长度为 1000 m 或更长,如果要测量更长的光纤,就需要使用长度差不超过 1000 m 的参考光纤,或者使用窄线宽的光源。因此该方法宜用于中、短光纤的精确长度测量。

4 结 论

从相位调制光链路建立了光纤长度测量系统的理论模型。此方法测量光纤的长度只和增益的自由光谱范围有关。实验结果表明,利用现有仪器和条件,可测到的光纤的最小相对长度达到 3 mm。在 100 m 相对光纤长度下,光纤的长度误差能控制在 0.05 mm 以内。

参 考 文 献

- 1 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying *et al.*. Optical principle research of space laser communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1006003
姜会林, 胡源, 丁莹等. 空间激光通信组网光学原理研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1006003
- 2 Di Xuejing, Tong Cheng, Zhang Xia *et al.*. Adaptive step-size constant-modulus algorithm for high-speed optical coherent communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1006004
邸雪静, 童程, 张霞等. 高速相干光通信系统中的自适应步长恒模算法 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1006004
- 3 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Adaptive path length control technique for four-mode differential laser gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0902010
汪之国, 龙兴武, 王飞等. 四频差动激光陀螺自适应程长控制技术 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0902010
- 4 Y. Katsuyama. In-service fiber line identification based on high-resolution fiber length measurement [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(1): 6~13
- 5 K. S. Jeon, H. J. Kim, D. S. Kang *et al.*. Optical fiber chromatic dispersion measurement using bidirectional modulation of an optical intensity modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1145~1147
- 6 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205001
孙浩, 忽满利, 乔学光等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205001
- 7 Zhang Chao, Duan Fajie, Xing Minghao *et al.*. Fiber-optic interferometer projection of real-time Fourier profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0207001

- 张超, 段发阶, 邢明浩等. 光纤干涉投射实时傅里叶轮廓术的研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0207001
- 8 M. Tateda, T. Horiguchi. Advances in optical time domain reflectometry [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1217~1224
- 9 L. Philen Dan, A. White Ian, F. Kuhl Jane *et al.*. Single-mode fiber OTDR: experiment and theory [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1982, **30**(10): 1487~1496
- 10 A. Kohlhaas, C. Fromchen, E. Brinkmeyer. High-resolution OCDR for testing integrated-optical waveguides; dispersion-corrupted experimental data corrected by a numerical algorithm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11): 1493~1502
- 11 W. Eickhoff, R. Ulrich. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**(9): 693~695
- 12 Zuyuan He, Takushi Kazama, Yusuke Koshikiya *et al.*. High-reflectivity-resolution coherent optical frequency domain reflectometry using optical frequency comb source and tunable delay line [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(26): B765~B769
- 13 Robert C. Youngquist, Sally Carr, D. E. N. Davies. Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(3): 158~160
- 14 Bing Qi, Andrew Tausz, Li Qian *et al.*. High-resolution, large dynamic range fiber length measurement based on frequency-shifted asymmetrical Sagnac interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3287~3289
- 15 Jia Bo, Qian Songrong, Hua Zhongyi *et al.*. Optic fiber length measurement using all-fiber interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(1): 73~75
- 贾波, 钱松荣, 华中一等. 全光纤干涉系统用于光纤长度测量实验[J]. 中国激光, 2002, **29**(1): 73~75
- 16 Huang Shaomei, Duan Fajie, Ye Shenghua. System of measuring range multiplication in the distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 514~517
- 黄绍梅, 段发阶, 叶声华. 光纤干涉测距中的量程倍增系统[J]. 光学学报, 2000, **20**(4): 514~517
- 17 Li Churui, Wang Chao, Xiao Qian. Novel fiber length measurement system based on fiber interferometer [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2011, **32**(2): 415~419
- 李楚瑞, 王超, 肖倩. 基于全光纤干涉的新型光纤长度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(2): 415~419
- 18 L. Liu, S. L. Zheng, X. M. Zhang *et al.*. Performance improvement of phase modulation with interferometric detection through low-biasing [J]. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 2010, **24**(1): 123~132
- 19 F. Bucholtz, Vincent J. Urick, M. S. Rogge *et al.*. Performance of analog photonic links employing phase modulation [C]. 2006 Coherent Optical Technologies and Applications Topical Meeting (COTA 2006), 2006. CFA6
- 20 Vincent J. Urick, Frank Bucholtz, Jason D. McKinney *et al.*. Long-haul analog photonics [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(8): 1182~1205

栏目编辑：王晓琰