

## 相控阵全光移相网络对空间波束电平的影响

苏君\* 邱琪 史双瑾  
(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

**摘要:** 全光移相网络以其宽带、高精度的优势极大地提高了光控相控阵天线的性能,但其引入的附加相位噪声,将导致空间波束电平指标劣化。基于全光移相网络噪声理论和相控阵理论,推导了激光器相对强度噪声、光载波传输链路插入损耗、激光器输出平均光功率与主、副瓣电平关系的理论公式。仿真结果表明在全光移相网络的典型应用参数下,上述3个参量的增大均会导致波束主瓣增益降低和副瓣电平升高,其中激光器相对强度噪声影响最为明显,为了优化波束电平指标,激光器相对强度噪声需低于-140 dB/Hz。

**关键词:** 相控阵天线; 全光移相网络; 波束形成; 波束电平

**中图分类号:** TN29; TN821+8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)07-1762-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.01427

## Effect of Optical Phase-shifting Network on Beam Levels of Phased Array Antenna

Su Jun Qiu Qi Shi Shuang-jin

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The performance of optically controlled phased array antenna is greatly improved by the optical phase-shifting network with its advantages of broad bandwidth and high precision, however the additional phase noise of the optical phase-shifting network could lead to the deterioration of the space beam levels. Based on the analysis of the optical phase-shifting networks noise characteristics and phased array antenna theory, the formulas are derived in this paper, with a description of the relationship between the figure of Relative Intensity Noise (RIN) of laser, fiber links insertion loss, laser average power, and the main lobe level as well as the side lobe level. The simulation and theoretical study show that, with the typical parameter in the optical phase-shifting network, the increase of the three parameters is able to lead to reduce the main lobe gain and raise the side lobe level. The impact of RIN on lobe levels is more obvious. To optimize the lobe levels, the relative intensity noise of laser should be less than -140 dB/Hz.

**Key words:** Phased array antenna; Optical phase-shifting networks; Beamformer; Lobe levels

### 1 引言

相控阵天线是天线阵面不做机械运动,通过改变天线阵面上辐射阵元的相位,进而控制空间电磁波场强分布实现波束扫描,其克服了机械结构对波束偏转方向和扫描速度的限制,能更有效地分配雷达波束在空间的扫描时间<sup>[1,2]</sup>。基于纯微波器件的传统相控阵天线已经实用化,但其中的微波移相器带宽有限,在宽带、宽角应用情况下天线将面临“孔径效应”和“渡越时间”的限制,天线波束会出现偏斜和脉冲展宽,严重降低天线性能<sup>[3]</sup>。为克服上述缺点,光控相控阵天线采用基于光纤延迟线的全光

移相网络技术实现波束形成,具有宽带、高精度、抗干扰的优点<sup>[4,5]</sup>。

### 2 全光移相网络噪声对空间波束的影响

全光移相网络结构框图如图1所示,天线阵元接收的微波信号经放大后调制光发射模块(E/O),将微波信号调制到光载波。光载波在对应光纤延迟线中延迟移相后经光学合波器叠加,并经由光接收模块(O/E)进行光电转换放大输出,形成接收波束<sup>[6,7]</sup>。网络中的光纤延迟线通过切换延迟状态获得不同的相位梯度,实现波束的空间扫描。

全光移相网络在完成移相和合波的过程中对传输的微波信号会带来相位偏差<sup>[8]</sup>,进而影响空间波束的电平。其中相位偏差的来源主要有两方面:(1)光延迟线和合波网络存在的延迟误差;(2)全光移相网络在调制解调过程中带入的噪声。延迟误差属于固

2013-09-17收到,2014-02-14改回

国家自然科学基金(61271030)和中央高校科研基本业务费(E022050205)资助课题

\*通信作者:苏君 stevensu27@126.com

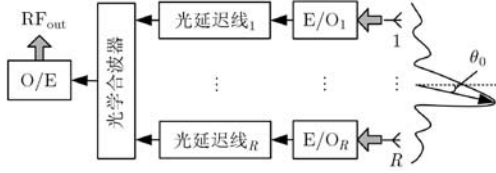


图1 全光移相网络结构框图

定误差，可以通过测量、校准等方式修正<sup>[9]</sup>。调制解调过程带来的噪声属于随机误差，会影响空间波束形成质量<sup>[10]</sup>，只能采用统计理论方法加以研究<sup>[11]</sup>。全光移相网络在微波传输中带来的噪声会导致空间波束出现主瓣增益降低和副瓣电平升高<sup>[12]</sup>。后文将基于光电噪声分析和相控阵天线理论研究全光移相网络噪声参数对相控阵波束主、副瓣电平的影响。

### 2.1 全光移相网络噪声分析

全光移相网络中微波传输链路主要包含两大部分：(1)光载波传输链路；(2)调制解调单元。光载波传输链路中全部为无源器件，主要包括光纤延迟线和光学合波器。该部分仅存在静态的插入损耗变化，不会对信号附加随机噪声。调制解调单元主要由光收发模块构成，其中激光器、光电二极管、前置放大器等均为有源器件，在信号变换过程中会对微波信号带来附加噪声<sup>[13]</sup>，这些噪声会转化为所传输微波信号的相位噪声，进而影响波束形成的质量。

全光移相网络中微波传输链路如图 2 所示。天线阵元输入的微波信号直接调制发射模块激光器(LD)产生信号光，经光载波传输链路传输后由接收模块光电二极管(PIN)还原，并经前置放大器放大输出。微波传输链路的噪声主要包括：LD 强度噪声、PIN 散粒噪声、PIN 暗电流噪声、负载电阻( $R_L$ )热噪声和放大器噪声等，在上述噪声中 PIN 管暗电流噪声比其它噪声低几个数量级，可忽略不计<sup>[14]</sup>。因此光接收模块中前置放大器的输入噪声功率可表示为

$$N_{Aim} = R'_L \left[ \text{RIN}(\eta_{\text{PIN}} \cdot \alpha \cdot \bar{P})^2 B + 2q(\eta_{\text{PIN}} \cdot \alpha \cdot \bar{P})B + \frac{4KTB}{R_L} \right] \quad (1)$$

其中  $R'_L$  为 PIN 负载电阻与放大器输入电阻的等效电阻，RIN 为激光器相对强度噪声， $\eta_{\text{PIN}}$  为 PIN 管

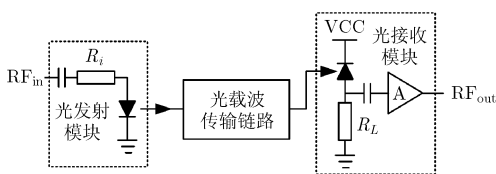


图2 全光移相网络微波传输链路示意图

响应度， $\alpha$  为光载波传输链路插入损耗， $\bar{P}$  为 LD 输出平均光功率， $B$  为信号带宽， $q$  为电子电量， $K$  为玻尔兹曼常数， $T$  为绝对温度。

根据放大器噪声系数的定义，并且有输出信号功率  $P_{so} = A \cdot P_{si}$ ，其中  $A$  为放大器功率增益，则前置放大器输出噪声功率可表示为

$$N_{Aout} = F_N \cdot A \cdot N_{Ain} \quad (2)$$

其中  $F_N$  为前置放大器噪声系数。

应用于微波信号传输的调制解调单元一般为 0 dB 增益系统，即当光收发模块通过短光纤直连时，输入输出微波信号功率相等。但调制解调过程中，LD 和 PIN 均存在损耗，因此需要前置放大器提供一定的增益补偿。由图 2 的结构模型和光电器件的响应关系，可以获得接收模块中前置放大器的功率增益为

$$A = \frac{P_o R_i}{(\eta_{\text{LD}} \eta_{\text{PIN}})^2 P_i R'_L} \approx \frac{1}{(\eta_{\text{LD}} \eta_{\text{PIN}})^2} \quad (3)$$

其中  $\eta_{\text{LD}}$  为 LD 量子效率，在放大器输入阻抗很高的情况下有  $R'_L \approx R_L = R_i = 50 \Omega$ 。

因为调制解调单元为 0 dB 增益系统，在光载波传输链路插入损耗为  $\alpha$  的情况下，链路输出微波信号功率  $P_o$  可表示为

$$P_o = P_i \cdot \alpha \quad (4)$$

全光移相网络中，光收发模块以宽带方式工作，每个频点的噪声电压均会对微波信号带来相位噪声<sup>[15]</sup>。由矢量叠加理论，在频点  $f_0 + \Delta f$  处噪声功率远小于信号功率时，其对信号产生的相位噪声方差可近似表示为

$$\sigma_{\varphi}^2|_{f_0+\Delta f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_{f_0+\Delta f}}{P_o} \quad (5)$$

由于各频点处噪声信号不相关，且具有均匀的谱分布，故整个频带内噪声对微波信号带来的相位噪声方差可以直接相加<sup>[16]</sup>，因此由式(1)~式(5)，总的相位噪声方差可表示为

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{N_{Aout}}{2P_o} = F_N \left[ \text{RIN}(\eta_{\text{PIN}} \cdot \alpha \cdot \bar{P})^2 BR_L + 2q(\eta_{\text{PIN}} \cdot \alpha \cdot \bar{P})BR_L + 4KTB \right] \sqrt{[2P_i \cdot \alpha \cdot (\eta_{\text{LD}} \eta_{\text{PIN}})]^2} \quad (6)$$

可见，全光移相网络对传输的微波信号附加的相位噪声，主要受激光器 RIN，电光、光电转换效率，光载波传输链路插入损耗，热噪声及其前置放大器噪声系数的影响。

### 2.2 相位噪声对空间波束电平的影响

全光移相网络中的光电参数变化直接关系着每个天线阵元微波信号附加相位噪声的大小，进而影

响空间波束主、副瓣电平。为了简化分析过程这里仅讨论1维线阵,如图1所示,该线阵有 $R$ 个阵元。

线阵中第 $i$ 个天线阵元的电流可以表示为<sup>[17]</sup>

$$I_i = f_i(\theta) I_0 e^{j\Delta\varphi} e^{j[-ikd\sin\theta_0]} \quad (7)$$

其中 $f_i(\theta)$ 为天线单元方向图, $\theta_0$ 为波束偏转角, $d$ 为天线阵元间距。天线单元方向图 $f_i(\theta)$ 为各项同性,天线阵面均匀分布照射,则在 $\theta_0$ 指向下线阵天线归一化方向图函数 $F(\theta)$ 为

$$F(\theta) = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R e^{j[ikd(\sin\theta - \sin\theta_0) + \Delta\varphi_i]} \quad (8)$$

空间波束功率分布为

$$P(\theta) = |F(\theta)|^2 = FF^* \quad (9)$$

全光移相网络中微波传输链路的信噪比直接决定了天线阵元相位噪声大小,这会导致空间波束主、副瓣电平出现劣化。为了获得误差情况下空间波束的电平参数,归一化平均空间波束功率分布函数可表示为

$$\begin{aligned} \overline{P(\theta)} = \frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R \left\{ \cos[(i-m)kd(\sin\theta - \sin\theta_0)] \right. \\ \cdot \left[ \overline{\sin\Delta\varphi_i \sin\Delta\varphi_m} + \overline{\cos\Delta\varphi_i \cos\Delta\varphi_m} \right] \\ \left. - \sin[(i-m)kd(\sin\theta - \sin\theta_0)] \right. \\ \cdot \left. \left[ \overline{\sin\Delta\varphi_i \cos\Delta\varphi_m} - \overline{\cos\Delta\varphi_i \sin\Delta\varphi_m} \right] \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

其中相位误差 $\Delta\varphi$ 满足均值为0,方差为 $\sigma_\varphi^2$ 的高斯分布,并且有

$$\left. \begin{aligned} \overline{\sin(\Delta\varphi)} &= 0 \\ \overline{\cos(\Delta\varphi)} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \cos(\Delta\varphi) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\varphi^2}} \\ &\cdot \exp\left[-\frac{\Delta\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}\right] d\Delta\varphi = \exp\left[-\frac{\sigma_\varphi^2}{2}\right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当 $i=m$ 时,

$$\overline{P(\theta)}\Big|_{i=m} = \frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R 1 = \frac{1}{R} \quad (12)$$

当 $i \neq m$ 时,

$$\overline{P(\theta)}\Big|_{i \neq m} = \frac{e^{-\sigma_\varphi^2}}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R \cos[(i-m)kd(\sin\theta - \sin\theta_0)] \quad (13)$$

其中

$$\frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R \cos[(i-m)kd(\sin\theta - \sin\theta_0)] = FF^* \quad (14)$$

为无误差情况下的天线波束空间功率分布。

由式(12)和式(13),式(10)可表示为

$$\begin{aligned} \overline{P(\theta)} &= \overline{P(\theta)}\Big|_{i \neq m} + \overline{P(\theta)}\Big|_{i=m} \\ &= e^{-\sigma_\varphi^2} \left( FF^* - \frac{1}{R} \right) + \frac{1}{R} \quad (15) \end{aligned}$$

在实际应用的光纤延迟线中相位误差方差 $\sigma_\varphi^2$ 非常小,因此 $e^{-\sigma_\varphi^2}$ 的值接近于1,随着阵元数 $R$ 的增加方括号中的部分逐渐减小,并趋近于0。在实际应用当中 $R$ 在大于10以后系统误差较小,可以近似将主瓣增益的变化为

$$\frac{G}{G_0} = e^{-\sigma_\varphi^2} + \left[ \frac{1 - e^{-\sigma_\varphi^2}}{R \cdot FF^*} \right] \rightarrow \frac{G}{G_0} \approx e^{-\sigma_\varphi^2} \quad (16)$$

副瓣电平升高量可近似表示为

$$D_{SL} \approx \frac{1 - e^{-\sigma_\varphi^2}}{R} \quad (17)$$

通过式(16)和式(17)可知,波束主、副瓣电平劣化主要受全光移相网络对微波信号附加的相位噪声方差大小的影响,同时副瓣电平升高与天线阵元数呈近似反比例函数关系,随着天线阵元数的增加副瓣电平升高量逐渐降低,波束性能可得到优化。

### 3 仿真分析

通过上节的理论推导,获得了全光移相网络中激光器输出平均光功率( $\bar{P}$ )、激光器相对强度噪声(RIN)和光载波传输链路插入损耗( $\alpha$ )、天线阵元数( $R$ )与天线主、副瓣电平劣化程度之间的理论公式,下面将通过仿真计算定量分析这几个参数之间的相互关系。

针对式(16)和式(17)仿真计算在不同激光器RIN情况下,激光器输出平均光功率与波束主、副瓣电平之间的关系。全光移相网络仿真参数为:LD量子效率0.1 W/A;PIN管响应度0.9 A/W;光载波传输链路插入损耗10 dB;发射模块输入微波功率-20 dBm;前置放大器噪声系数7 dB;微波链路工作频段2~6 GHz;负载电阻50  $\Omega$ ;电子电量 $1.6 \times 10^{-19}$  C;绝对温度300 K,天线阵元数为20。在激光器输出平均光功率在0~10 dBm范围内变化时,主瓣增益降低程度计算结果如图3所示。由于 $D_{SL}$ 为副瓣功率的增加值,结合理论副瓣电平计算公式,可获得有噪声情况下的副瓣电平实际值,与副瓣电平标准值相差即可获得副瓣电平的升高量,计算结果如图4所示。

针对式(16)和式(17)仿真计算在不同激光器RIN情况下,光载波传输链路插入损耗与波束主、副瓣电平之间的关系。其中激光器输出平均光功率5 dBm;插入损耗变化范围5~15 dB。仿真结果如图5和图6所示。

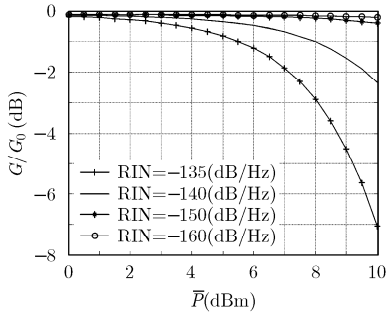


图3 不同RIN情况下激光器偏置点功率与主瓣增益降低的关系

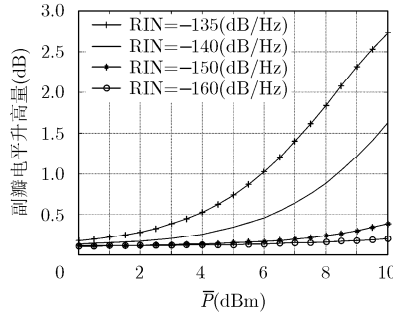


图4 不同RIN情况下激光器偏置点功率与副瓣电平升高的关系

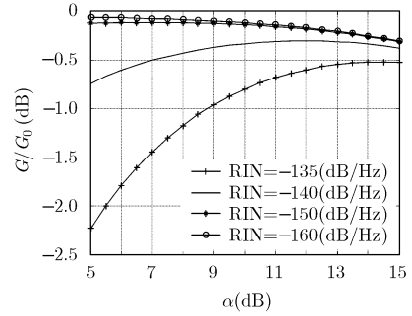


图5 不同RIN情况下插入损耗与主瓣增益降低的关系

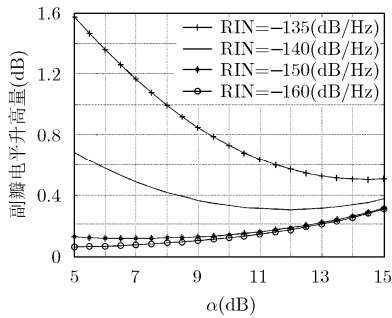


图6 不同RIN情况下插入损耗与副瓣电平升高的关系

图 3, 图 4, 图 5 和图 6 的仿真结果表明: (1) 主瓣增益降低存在初始值, 这主要是受收发模块中负载电阻的热噪声影响; (2) 在插入损耗一定情况下, 随着激光器输出平均光功率的升高, 主瓣增益继续降低这时散粒噪声和强度噪声起主要作用, 其中激光器 RIN 对主瓣增益降低影响最大, 当激光器 RIN 大于-140 dB/Hz 时, 主瓣增益和副瓣电平将快速劣化, 严重降低系统性能。现有的商用化 DFB 半导体激光器, 其 RIN 一般为-140 dB/Hz, 且具有最佳性价比; (3) 在平均输出光功率一定情况下, 在激光器 RIN 较低时, 主瓣增益随插入损耗增大而降低, 其原因是差损耗同时影响信号幅度、强度噪声和散粒噪声, 而对热噪声无影响, 这导致信噪比降低, 相位噪声方差增大; (4) 在激光器 RIN 较高时, 曲线存在明显的拐点, 其原因是插入损耗对强度噪声影响呈平方关系, 而与散粒噪声和信号幅度呈线性关系, 当插入损耗较低时强度噪声起主要影响, 随着插入损耗逐渐增大强度噪声对主瓣电平的影响迅速降低, 散粒噪声影响逐渐呈现。

在全光移相网络的典型应用参数下, 理论分析和系统仿真表明, 为使主、副瓣电平劣化程度处于较低水平, 激光器 RIN 应优于-140 dB/Hz, 光载波传输链路插入损耗小于 10 dB。

#### 4 结论

本文通过对全光移相网络噪声特性的分析, 结

合相控阵波束形成理论, 推导了全光移相网络中激光器 RIN、光载波传输链路插入损耗、激光器输出平均光功率与主瓣电平增益和副瓣电平升高之间的理论公式。理论和仿真研究结果表明, 在典型应用参数下, 全光移相网络的上述 3 个参量升高均会使微波信号附加相位噪声增大, 进而导致主、副瓣电平劣化, 其中激光器 RIN 的影响最为明显, 为优化波束电平指标, 激光器强度噪声需低于-140 dB/Hz。同时, 在特定的激光器 RIN 等级下, 通过优化光载波传输链路插入损耗和激光器输出平均光功率的组合, 可以获得最佳的波束电平指标。该研究成果对于分析全光移相网络参数与相控阵空间波束电平之间的关系提供了理论依据, 阐明了提升器件指标和优化系统参数的方向, 对指导光控相控阵天线的设计和应用具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 金添, 娄军, 宋千, 等. 虚拟孔径天线配置及其成像性能研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2458-2463.  
Jin Tian, Lou Jun, Song Qian, et al. Study on antenna configuration of virtual aperture and its associated imaging performance[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2458-2463.
- [2] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 一种米波相控阵雷达四代机目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1163-1169.  
Zhan Li-xiao, Tang Zi-yue, and Zhu Zhen-bo. The fourth generation fighters detection algorithm for metric-band phased array radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 1163-1169.
- [3] 刘肖萌, 高文军, 邓云凯. 有限扫描反射面天线相控波束重构技术[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 481-486.  
Liu Xiao-meng, Gao Wen-jun, and Deng Yun-kai. Beam reconfiguring technique for limited angle scanning reflector antenna with phase-only control[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 481-486.
- [4] 邱志成, 史双瑾, 邱琪. 高精度光纤延迟线的研究[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 72-75.

- Qiu Zhi-cheng, Shi Shuang-jin, and Qiu Qi. Research of high precision optical fiber delay line[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 72-75.
- [5] Chin S and Thevenaz L. Tunable photonic delay lines in optical fibers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(6): 724-738.
- [6] 宋英雄, 林如俭, 朱永华. 通过以太无源光网的射频电视传送技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 794-800.  
Song Ying-xiong, Lin Ru-jian, and Zhu Yong-hua. RF-TV transport over ethernet passive optical network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 794-800.
- [7] 徐建, 王志功, 江汉, 等. GSM-R 光纤直放站中射频光收发模块设计[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(4): 687-690.  
Xu Jian, Wang Zhi-gong, Jiang Han, et al. RF-optical transceiver module in GSM-R fiber optical repeater[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(4): 687-690.
- [8] 王雁. 毫米波相控阵雷达关键技术结构设计研究[J]. *电子机械工程*, 2009, 25(6): 14-17.  
Wang Yan. A study on structural design of millimeter-wave phased array radar[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2009, 25(6): 14-17.
- [9] 吴彭生, 谷一英, 程旭升, 等. 用于 X 波段相控阵天线的高速可调光纤延迟线[J]. *光通信技术*, 2013, (4): 5-7.  
Wu Peng-sheng, Gu Yi-ying, Cheng Xu-sheng, et al. High-speed tunable optic true-time delay line for X-band antenna[J]. *Optical Communication Technology*, 2013, (4): 5-7.
- [10] 曹培谦, 王国宏, 尤立文. 一种基于光纤延迟线的机载雷达有源干扰系统[J]. *电子信息对抗技术*, 2011, 26(2): 56-58.  
Cao Pei-qian, Wang Guo-hong, and You Li-wen. The airborne radar active jamming system based on fiber-optic delay line[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2011, 26(2): 56-58.
- [11] Avila-Ruiz J M, Moreno-Pozas L, Duran-Valdeiglesias E, et al. Frequency locked loop architecture for phase noise reduction in wideband low-noise microwave oscillators[J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2013, 7(11): 869-875.
- [12] Ivanov E N, Tobar M E, and Woode R A. Ultra-low-noise microwave oscillator with advanced phase noise suppression system[J]. *Microwave and Guided Wave Letters*, 1996, 6(9): 312-314.
- [13] Ma J X, Zhou M, Zhan Y, et al. A novel ROF link scheme with frequency quadrupling optical millimeter-wave carrying dual-stream of 10 Gbit/s 16-QAM signals[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 46(3): 81-87.
- [14] 邱琪. 光纤通信技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 93-95.  
Qiu Qi. *Fiber-Optical Communication Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 93-95.
- [15] 高树廷, 刘洪升. 相位噪声分析及对电路系统的影响[J]. *火控雷达技术*, 2003, 32(2): 58-63.  
Gao Shu-ting and Liu Hong-sheng. Analysis of phase noise and its effects on circuit systems[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2003, 32(2): 58-63.
- [16] 聂伟, 帅涛, 刘亚欢, 等. 相位噪声对卫星信号解调误码率的影响分析[C]. 第三届中国卫星导航学术年会, 广州, 中国, 2012: 1-5.  
Nie Wei, Shuai Tao, and Liu Ya-huan, et al. Effect of the time and frequency system phase noise on the bit-error of satellite signal[C]. Proceedings of the 3rd China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012, Guangzhou, China, 2012: 1-5.
- [17] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 11-14.  
Zhang Guang-yi and Zhao Yu-jie. *Phased Array Radar Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 11-14.
- 苏 君: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为光纤通信和光控相控阵雷达.
- 邱 琪: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光通信、微波光子学、激光技术与应用等.
- 史双瑾: 男, 1969 年生, 高级工程师, 研究方向为光纤通信和光电电子技术.