

doi: 10.3788/gzxb20144304.0406002

光纤延迟线噪声对相控阵波束指向的影响

苏君, 邱琪, 史双瑾

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘 要: 基于相位噪声和相控阵理论, 运用线阵天线原始方向图函数和光纤链路噪声系数公式, 根据天线波束指向实际误差进行合理近似, 推导了光延迟线链路噪声系数、天线阵元数与波束指向误差的理论公式. 采用常规光纤链路参量进行了仿真研究, 结果表明: 相控阵天线波束指向误差均方差随光纤链路噪声系数增大而增加, 随天线阵元数增加而减小, 指向误差与光纤延迟线链路噪声系数的 $1/2$ 次方成正比, 与阵元数的 $3/2$ 次方成反比. 在相控阵天线工作频段内, 低频波段受噪声系数影响更加明显.

关键词: 光纤通信; 相控阵天线; 波束形成; 波束指向; 相位噪声; 光链路; 光收发模块

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0406002-5

Impact of Optical Fiber Delay Line Noise on Beam Pointing 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: Based on phase noise and phased array antenna theory, using original linear array antenna pattern function and optical fiber link noise figure function, the theoretical formulas that describe relationship between the figure in optical fiber delay line links noise, the number of antenna elements and beam pointing error were derived by reasonable approximation according to actually beam pointing error. The normal optical fiber link parameters were applied to the simulation. The results demonstrated that mean square deviation of phased array antenna beam pointing error increases with the increasing of optical fiber link noise figure and decreases with the increasing of elements number of the array, the phased array antenna beam pointing error is in proportion to $1/2$ power of optical fiber delay line links noise figure, in inverse proportion to $3/2$ power of number of array elements. In phased array antenna operating frequency bands, it is more obvious impact of optical fiber delay line links noise in low frequency band.

Key words: Optical fiber communication; Phased array antenna; beamforming; Beam pointing; Phase noise; Optical links; Optical transceivers

OCIS Codes: 060.2330; 060.1155; 060.4080

0 引言

传统的相控阵天线其移相单元多采用微波移相器等微波器件, 受限于该类器件的自身特性, 传统相控阵天线在体积、重量、功耗和插入损耗等方面都存在缺陷, 并且传统微波器件难以实现宽带应用. 在宽带、宽角应用情况下, 相控阵天线将面临“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

降低相控阵天线的性能^[1].

光控相控阵天线克服上述缺陷成为了研究热点, 其特点是基于光纤延迟线技术在光域对微波信号进行实时延迟移相, 也称为真延时. 光纤延迟线的实时延迟可以为相控阵天线提供宽带延时移相, 实现天线的宽带、宽角扫描. 同时光纤延迟线具有高准确度和抗干扰的优点, 也极大地提高了相控阵天线的波束性能.

基于光延时原理的不同光纤延迟线技术方案可分

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61271030)和中央高校科研基本业务费(No. E022050205)资助

第一作者: 苏君(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤通信及相控阵天线. Email: stevensu27@126.com

导师(通讯作者): 邱琪(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信及光电子技术. Email: qqiu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2013-08-08; 录用日期: 2013-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

为三大类:基于光程选择^[2-3]、基于波长选择^[4-5]和基于光副载波合成技术^[6].其中基于磁光开关光程选择的光纤延迟线具有功耗低、速度快、插入损耗低等方面的综合优势,是现有光纤延迟线中应用最为广泛的技术方案.

光纤延迟线在光控相控阵天线的应用,技术上需要实现高准确度延迟,并降低光纤微波链路带来噪音的影响^[7-8],以及解决体积、功耗、成本和工艺等问题.延迟不准确度决定了波束参数的固定偏差,并且与天线工作频率密切相关.链路噪音决定了波束参数的波动范围.本文基于相位噪音和相控阵天线理论,重点深入研究光纤延迟线链路噪音对相控阵波束的指向准确度的影响.

1 光控相控阵天线工作原理

图1为光控相控阵接收天线结构框图.该天线将微波信号调制到光波,在光纤延迟中对信号进行延迟移相,通过各个天线阵元的相位合成实现空间场强分布变化,控制波束扫描.

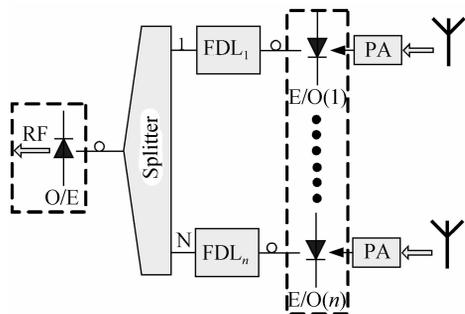


图1 光控相控阵天线结构

Fig.1 Structure of optically controlled phased array antenna

在该结构中天线阵元接收的微波信号经前置放大(Pre-Amplification, PA)后驱动光发射模块(Electronic/Optical, E/O)将微波信号调制到光波,经光纤延迟线(Fiber Delay Line, FDL)延迟移相后在光纤耦合器(Splitter)中实现光能量叠加,最后通过光接收模块(Optical/Electronic, O/E)解调还原,形成空间接收波束.在这个过程中光纤延迟线是实现整个变换过程的核心部件.

2 光纤链路参量对空间波束的影响

光控相控阵天线通过控制天线阵元的辐射相位在空间形成波束,每个天线阵元的辐射相位准确度直接关系到空间波束的质量.在这个过程中相位误差主要有两方面:1)光纤延迟线带来的延迟误差(如光纤延迟线的长度误差);2)光纤链路对微波信号带入的相位噪音^[9].延迟误差在特定的移相状态下属于固定误差,可以通过天线定标获得,并通过校准等方式加以修正.相位噪音属于随机误差,只能采用统计理论的方法给出

空间波束参数的误差范围.

2.1 光纤链路的相位噪音

光控相控阵天线中微波信号在移相过程中会经历调制和解调两个过程,光纤链路会带来噪音,并导致还原后的微波信号产生相位噪音^[10],影响波束指向.

一个理想的本振信号是在 f_0 处的单一无限冲击函数,但是实际的频谱中都不可避免地存在噪音边带,对本振信号带来寄生调幅和寄生调相^[11],其谱线结构如图2所示.对于光控相控阵天线而言其工作带宽很大,噪音边带连续分布并且频谱很宽.为分析噪音对信号 f_0 的调制结果,假定在频率为 $f_0 + \Delta f$ 处,带宽为1 Hz的噪音功率为 P_n ,在极短的时间内可认为噪音电压为正弦信号,通过矢量分析可以获得噪音对信号的相位调制^[12],如图3所示.

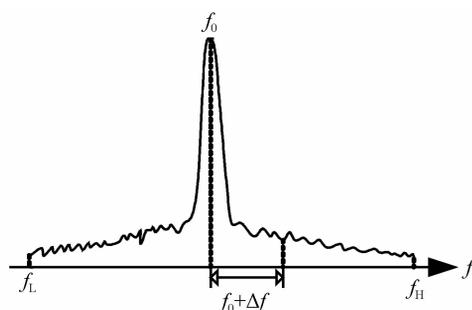


图2 本振信号及噪音频谱

Fig.2 Spectrum of local oscillator and noise

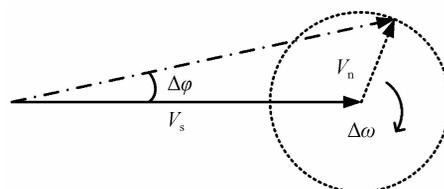


图3 本振信号被噪音调制示意图

Fig.3 Diagram of Local oscillator modulated by noise

矢量分析中将本振 f_0 看作静止,其幅度为 V_s ,噪音分量以 $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ 的角速度旋转,幅度为 V_n .则合矢量相位变化可表示为

$$\tan(\Delta\phi) = \frac{V_n \sin \Delta\omega t}{V_s + V_n \cos \Delta\omega t} \quad (1)$$

通常情况下存在 $V_s \gg V_n$,因此 $\Delta\phi$ 可近似表示为

$$\Delta\phi = V_n \sin \Delta\omega t / V_s \quad (2)$$

因相位变化是一个随机过程,可通过统计理论方法进行分析,其方差可表示为

$$D(\Delta\phi) = E(\Delta\phi^2) - [E(\Delta\phi)]^2 \quad (3)$$

根据常识显然有 $E(\Delta\phi) = 0$,并且可计算得到

$$D(\Delta\phi) = E(\Delta\phi^2) = V_n^2 / 2V_s^2 = P_n / 2P_s \quad (4)$$

$D(\Delta\phi)$ 即为 $f_0 + \Delta f$ 处,带宽为1 Hz的噪音信号对本振带入的相位方差,其单位为 rad^2/Hz .在光纤链路整个工作频带内,不同频点处噪音电压的频率和相位独立不相关,故整个频带内噪音对本振带入的总相

位方差可表示为

$$D(\Delta\varphi)_{\text{BW}} = \frac{1}{2P_s} \int_{f_c}^{f_u} P'_n df \quad (5)$$

式中 P'_n 为频带内噪声底功率谱密度, P_s 为本振信号功率. 由信噪比的定义可知, 式(5)同时表示了光链路中接收模块的输出信噪比. 因此总相位方差为

$$D(\Delta\varphi)_{\text{BW}} = 1/2(S/N)_{\text{out}} = N_F/2(S/N)_{\text{in}} \quad (6)$$

式中 $(S/N)_{\text{in}}$ 为光发射模块的输入信噪比, N_F 为光纤链路的等效噪声系数. 可见在光控相控阵天线中单个天线阵元的本振信号的相位方差与光纤链路的输入信噪比和传输噪声系数直接相关.

2.2 光纤链路噪声系数对空间波束指向的影响

在光控相控阵天线中光纤链路的输入信噪比是一个定量, 而不同的光纤链路其传输噪声系数是不同的, 直接关系着每个天线阵元微波信号的相位噪声大小, 进而影响空间波束的指向准确度^[13-15]. 下文将对此展开分析. 为了简化分析过程这里仅讨论一维线阵. 如图4所示, 一维线阵中有 R 个阵元.

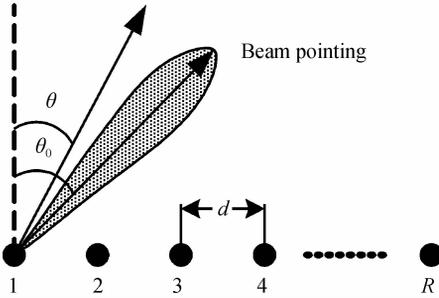


图4 一维线阵示意图
Fig. 4 Geometry for line source

线阵中第 i 个天线阵元的电流可以表示为

$$I_i = f_i(\theta) I_0 e^{j\Delta\varphi_i} e^{[-jk d \sin \theta_i]} \quad (7)$$

式中 $f_i(\theta)$ 为天线阵元方向图, θ_0 为波束偏转角, d 为天线阵元间距. 同时为了简化计算, 假定天线阵元方向图 $f_i(\theta)$ 为各项同性, 即天线阵面均匀分布照射, 则在 θ_0 指向下线阵天线归一化方向图函数 $F(\theta)$ 为

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

空间波束功率分布为

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

光纤链路的信噪比关系着天线阵元相位噪声大小, 这会导致空间波束出现指向误差. 为了获得误差情况下空间波束的实际指向, 需要求得空间功率分布的斜率函数 $S(\theta)$, $S(\theta)$ 可表示为

$$S(\theta) = \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} = -\frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R \{ (i-m) k d \cos \theta \cdot \sin [(i-m) k d (\sin \theta - \sin \theta_0) + (\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_m)] \} \quad (10)$$

当 $S(\theta) = 0$ 时, 各个解对应空间功率分布的极大值, 即主瓣或副瓣的指向角, 由空间波束主瓣偏斜的实际情况可知, 存在一定相位误差的情况下主瓣偏斜程度不大, 且在理论指向 θ_0 附近. 因此 $S(\theta)$ 在 θ_0 处是缓变函数, 可采用一阶泰勒展开近似, 表示为

$$S(\theta) = S(\theta_0) + \frac{\partial S(\theta_0)}{\partial \theta} (\theta - \theta_0) \quad (11)$$

令主瓣的指向误差为 $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, 同时有 $S(\theta) = 0$, 则

$$\Delta\theta = -S(\theta_0) / \frac{\partial S(\theta_0)}{\partial \theta} \quad (12)$$

求解 $S(\theta_0)$ 的均值可得

$$\overline{S(\theta_0)} = -\frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R (i-m) k d \cdot \cos \theta_0 [\overline{\sin \Delta\varphi_i \cos \Delta\varphi_m} - \overline{\cos \Delta\varphi_i \sin \Delta\varphi_m}] \quad (13)$$

由相位误差的实际情况可知, $\Delta\varphi$ 满足均值为 0, 方差为 $D(\Delta\varphi)$ 的高斯分布, 且 $\Delta\varphi$ 为近似为 0 的小量. 故存在

$$\text{当 } i \neq m \text{ 时, } \overline{\sin \Delta\varphi_i} = \overline{\sin \Delta\varphi_m} = 0;$$

$$\text{当 } i = m \text{ 时, } \overline{\sin \Delta\varphi_i \cos \Delta\varphi_i} = \frac{1}{2} \overline{\sin (2\Delta\varphi_i)} = 0;$$

因此可得 $\overline{S(\theta_0)} = 0$, 由式(12)可得 $\overline{\Delta\theta} = 0$, 即波束主瓣指向在理论指向 θ_0 附近, 且误差均值为 0.

主瓣指向误差的方差 $D(\Delta\theta)$ 可表示为

$$D(\Delta\theta) = \overline{[\Delta\theta - \overline{\Delta\theta}]^2} = \overline{\Delta\theta^2} = \overline{S^2(\theta_0)} / \overline{\left[\frac{\partial S(\theta_0)}{\partial \theta} \right]^2} \quad (14)$$

式中

$$\frac{\overline{\partial S(\theta_0)^2}}{\partial \theta^2} = \left[\frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R (i-m) k d \cos \theta_0 \overline{\sin (\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_m)} - (i-m)^2 k^2 d^2 \cos^2 \theta_0 \overline{\cos (\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_m)} \right]^2 \approx \left[\frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R (i-m)^2 k^2 d^2 \cos^2 \theta_0 \right]^2 = \frac{k^4 d^4 \cos^4 \theta_0 (R+1)^2 (R-1)^2}{36} \quad (15)$$

$$\overline{S^2(\theta_0)} = \overline{\left[\frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R (i-m) k d \cos \theta_0 \sin (\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_m) \right]^2} = \frac{k^2 d^2 \cos^2 \theta_0}{R^2} \overline{\left[\sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R (i\Delta L_i + m\Delta L_m - m\Delta L_i + i\Delta L_m) \right]^2} = \frac{k^2 d^2 \cos^2 \theta_0}{R^2} \sum_{i=1}^R \sum_{m=1}^R [4mi - 4(R+1)m + (R+1)^2] \overline{\Delta\varphi_i \Delta\varphi_m} \quad (16)$$

由于 $\Delta\varphi_i$ 、 $\Delta\varphi_m$ 互不相关, 且满足 $\overline{\Delta\varphi_i} = \overline{\Delta\varphi_m} = 0$, 方差为 $D(\Delta\varphi)_{\text{BW}} = N_F/2(S/N)_{\text{in}}$

当 $i \neq m$ 时, $\overline{\Delta\varphi_i \Delta\varphi_m} = 0$;

当 $i = m$ 时, $\overline{\Delta\varphi_i \Delta\varphi_m} = D(\Delta\varphi)_{\text{BW}} = N_F/2(S/N)_{\text{in}}$;
故

$$\overline{S^2(\theta_0)} = \frac{k^2 d^2 \cos^2 \theta_0 (R+1)(R-1) N_F}{6R(S/N)_{in}} \quad (17)$$

将式(15)、(17)代入式(14)可得

$$\overline{\Delta\theta^2} = \frac{6N_F}{k^2 d^2 \cos^2 \theta_0 R(R+1)(R-1)(S/N)_{in}} \quad (18)$$

对于实际相控阵天线,阵元数 R 一般较大,则指向误差 $\Delta\theta$ 的均方差 $\Delta\theta_{rms}$ 可近似表示为

$$\Delta\theta_{rms} \approx \frac{1}{kd \cos \theta_0} \sqrt{\frac{6N_F}{R^3 (S/N)_{in}}} \quad (19)$$

通过式(19)可知,主瓣指向偏斜的均方差受限于四个参量:光纤链路的噪音系数 N_F 、天线阵元间距 d 、波束偏转角 θ_0 和天线阵元数 R 。结合上述推导公式,针对以下特定相控阵天线进行仿真分析,其中相控阵天线阵元进入光纤链路的微波信号功率为 -30 dBm,噪音底功率 -155 dBm/Hz,天线工作频率范围 $2 \sim 6$ GHz,天线阵元间距为中心波长(4 GHz)的一半,波束理论指向 $\theta_0 = 0$ 。针对不同的天线阵元数 R ,指向误差均方差 $\Delta\theta_{rms}$ 与等效噪音系数 N_F 之间关系的仿真结果如图 5、6 所示。

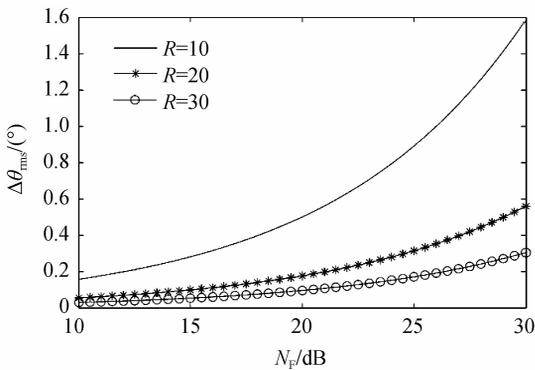


图 5 不同阵元数下 $\Delta\theta_{rms}$ 与 N_F 关系仿真图($f_0=4$ GHz)
Fig. 5 Relationship between $\Delta\theta_{rms}$ and N_F with different elements($f_0=4$ GHz)

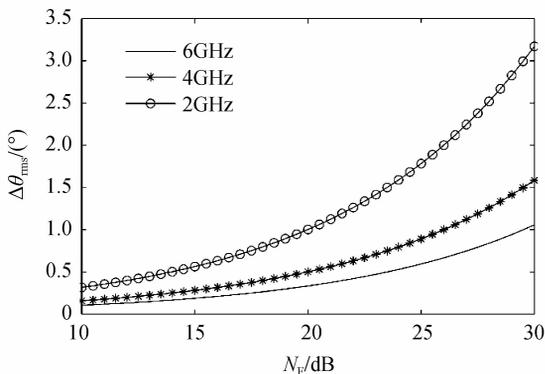


图 6 不同工作频率下 $\Delta\theta_{rms}$ 与 N_F 关系仿真图($R=10$)
Fig. 6 Relationship between $\Delta\theta_{rms}$ and N_F with different frequency($R=10$)

由仿真结果可见:1)天线波束指向误差均方差随光纤链路噪音系数增大而增加,与光链路噪音系数的 $1/2$ 次方成正比;2)天线波束指向误差均方差随天线阵元数增加而减小,与阵元数的 $3/2$ 次方成反比;3)在

相控阵天线工作频段内,低频波段受光纤链路噪音系数影响更加明显。

本文基于相控阵天线波束形成理论,运用线阵天线原始方向图函数和光纤链路噪音系数公式,根据天线波束指向实际误差进行合理近似,推导获得了波束指向误差公式。采用常规的光链路参量进行了仿真研究,与现有基于计算机数值仿真的模拟统计方法^[16]相比,计算误差相当,但计算量极大减小。仿真结果表明,增加阵元数和减少光纤链路噪音是提高指向准确度的有效技术手段,对于光控相控阵天线的性能估算和指标分配具有参考价值。

3 结论

光纤延迟线在光控相控阵天线中的广泛应用,极大地提高了相控阵天线的性能,同时光纤链路的噪音会对天线波束指向带来误差。本文推导了光纤延迟线链路噪音系数、天线阵元数与波束指向误差标准差之间的理论公式。理论和仿真研究结果表明,针对应用于电子对抗和目标侦查等对波束指向准确度要求较高的宽带相控阵天线,降低光纤链路的噪音系数,优化天线工作频率,增加天线阵元数均可有效地降低波束指向误差,其中光纤链路噪音系数的大小对系统影响最为明显。该理论研究结果对于光纤延迟线在光控相控阵天线的的应用具有重要意义。

参考文献

- [1] JIA Chun-yan, LI Dong-wen, YE Li-hua, *et al.* Phased array antenna and optical-controlled phased array antenna [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, **29**(2): 598-601. 贾春燕,李冬文,叶莉华,等. 相控阵雷达与光控相控阵雷达[J]. *电子器件*, 2006, **29**(2): 598-601.
- [2] QIU Zhi-cheng, SHI Shuang-jin, QIU Qi. Research of high precision optical fiber delay Line [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(6): 72-75. 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.
- [3] WENG Zi-hua, ZHU Jin-pan, HE Jing-yan, *et al.* All-fiber Magneto-optic switch with the nanosecond-level switching-time [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1441-1446. 翁梓华,朱金攀,何竞彦,等. 纳秒量级开关时间的全光纤磁光开关[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1441-1446.
- [4] GRANIERI S, JAEGER M, SIAHMAKOUN A. Multiple-beam fiber-optic beamformer with binary array of delay lines [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(12): 3262-3272.
- [5] LI Yong-qian, YAO Guo-zhen, YANG Zhi. A high precision fiber bragg grating wavelength demodulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1405-1411. 李永倩,姚国珍,杨志. 一种高精度光纤光栅波长解调系统[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1405-1411.
- [6] BURLA M, ROELOFFZEN C G H, ZHUANG L M, *et al.* System integration and radiation pattern measurements of a phased array antenna employing an integrated photonic beamformer for radio astronomy applications [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(7): 789-802.

- [7] ZHANG Wen-qi, LIU Wei-wei. Effect of digital phase shifter with different digits on accuracy of antenna beam direction[J]. *Modern Navigation*, 2013, (2): 153-156.
张文琪,刘伟伟. 移相器位数对相控阵天线指向准确度的影响[J]. *现代导航*, 2013, (2): 153-156.
- [8] WEN Ai-jun, FU Wei, PAN Qing. Generation and performance analysis of single sideband RZ signal for 40Gb/s optical transmission system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 421-424.
文爱军,傅炜,潘青. 40Gb/s 光纤传输单边带归零信号的产生和性能分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 421-424.
- [9] ZHOU Ming-tuo, SHARMA A B, ZHANG Jian-guo, *et al.* A novel configuration for millimeter-wave Radio-over-Fiber (ROF) transmission systems with remote Local-oscillator delivery[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1725-1729.
周明拓, SHARMA AB,张建国,等. 一个新型的毫米波无线信号光纤传输系统及本振信号远程传送结构[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1725-1729.
- [10] BANAT M M. Statistical characterization of filtered phase noise in optical receivers[J]. *IEEE Communications Letters*, 2003, **7**(2): 85-87.
- [11] IVANOV E N, TOBAR M E. Low phase-noise microwave oscillators with interferometric signal processing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(8): 3284-3294.
- [12] GAO Shu-ting, LIU Hong-sheng. Analysis of phase noise and its effects on circuit systems[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2003, **32**(2): 58-63.
高树廷,刘洪升. 相位噪音分析及对电路系统的影响[J]. *火控雷达技术*, 2003, **32**(2): 58-63.
- [13] SHEN J J, PEARSON L W. The phase error and beam-pointing error in coupled oscillator beam-steering arrays[J]. *Antennas and Propagation*, 2005, **53**(1): 386-393.
- [14] JIANG W, GUO Y C, LIU T H. Comparison of random phasing methods for reducing beam pointing errors in phased array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(4): 782-787.
- [15] VESCOVO R. Reconfigurability and beam scanning with phase-only control for antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, **56**(6): 1555-1565.
- [16] ROTMAN R, ROTMAN S, TUR M. Noise considerations for wideband true time delay photonic beamformers[C]. *IEEE Radar Conference*, 2008: 1393-1398.