

电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用

何云涛 江月松 王长伟

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要 介绍了一种新型被动综合孔径成像探测方法: 视场辐射信号被接收和放大后, 通过电光幅度调制将其幅度和相位信息加载到光波上, 经光纤传输在末端形成阵列, 通过光学系统直接成像, 将视场实时恢复出来。该方法可实现工作在微波、毫米波和太赫兹波段的高分辨力实时成像探测的目的。深入分析了电光调制器在综合孔径成像探测中的应用, 建立电光调制模型, 讨论了在小信号调制下的电光幅度调制近似理论。通过数值计算与仿真分析, 得到综合孔径成像探测中电光调制器的调制信号强度限制的有关结论。结果表明, 利用上变频电光调制技术和光信息处理, 所得到的成像仿真图的半峰全宽和信噪比性能都优于传统的基于下变频技术的成像仿真结果。

关键词 成像探测; 综合孔径; 电光调制; 上变频

中图分类号 TH751.2 **文献标识码** A

Application of Electro-Optic Modulation in Passive Synthetic Aperture Imaging Detection

He Yuntao Jiang Yuesong Wang Changwei

(School of Electronic Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083, China)

Abstract A new passive synthetic aperture imaging detection method is presented. The radiation signal of field of view is received and amplified, and then the amplitude and phase information of the amplified signal is modulated to an optical carrier by electro-optic modulator. The optical signal is transmitted by fibers and a fiber array is shaped by the end of the fibers. The image is formed synchronously and directly by an optical system using the fiber array. The imaging approach can be used in extremely high resolution detection at microwave, millimeter wave, and terahertz frequencies. The application of the electro-optic modulation technique in passived synthetic aperture imaging is analyzed deeply and the model of electro-optic modulation is established. And the approximation of small signal modulation in the electro-optic modulation is discussed. By simulating computation and analysis, the intensity constraint of the modulated signal in an electro-optic modulator is gained. Result shows that the full-width at half maximum (FWHM) and signal-to-noise ratio (SNR) with upconversion electro-optic modulation and optical information processing are both better than those with traditional downconversion imaging technique.

Key words imaging detection; synthetic aperture; electro-optic (EO) modulation; up conversion

1 引 言

被动综合孔径成像技术一直受到广泛关注, 目前, 研究的工作波段覆盖了从微波到太赫兹波的全部波段。任何高于绝对零度的物体都会辐射电磁波, 被动成像探测是利用探测物体的电磁辐射, 并运用特定的反演算法得到目标的亮温图。对被动式成

像系统, 要获得高的空间成像分辨力, 综合孔径技术是一种有效的方法^[1~3]。该技术利用若干个体积小、重量轻的小孔径天线按照载体形状和尺寸大小, 依据最小冗余空间频率覆盖、最佳成像质量等规则排列成稀疏孔径阵列, 通过两天线信号组合复互相关运算和离散傅里叶变换运算而重构出所观测目

收稿日期: 2007-10-08; **收到修改稿日期:** 2007-12-10

基金项目: 武器装备预研基金(9140A21041006HK0126)、武器装备探索研究项目(7130730)和航天创新基金(06CASC0213-2)资助课题。

作者简介: 何云涛(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事综合孔径阵列成像等方面的研究。

E-mail: taoyunhe@ee.buaa.edu.cn

导师简介: 江月松(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事成像信息科学与技术、激光空间信息技术、红外光电信息获取与处理技术等方面的研究。E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

标的图像。随着技术的发展,部分系统已经开始应用于环境检测、大气与海洋监测、遥感成像、军事侦察等诸多领域^[4~6]。

在被动综合孔径成像系统中,由于天线接收视场目标辐射信号衰减较大,在传输前应调制至更适合传输的频率。选择之一是将其中变频至一中频信号,通过同轴电缆传输。目前研究的被动综合孔径成像系统基本都采用这种方法^[1~6]。但对于现代遥感、军事侦察以及反恐等应用而言,这种传统的成像方法存在以下不足:1)系统复杂,成本高;2)难以实现实时成像;3)易受电磁干扰,重量重,体积大。另一种传输处理方式是目标辐射信号经上变频至光载波频率,由光纤传输^[7~9]。光纤传输信号具有高带宽,低衰减和抗电磁干扰等优点。此外,将视场目标的辐射信号加载到光载波上,在光纤末端形成阵列,可采用光学综合孔径成像技术^[10~13],在光波频率上直接成像,无需解调出毫米波信号;与传统的合成孔径成像系统相比,避免了采用大量的复相关器(其数目随天线数目的增加呈几何增长),代之以高效的光学系统,整个设备简单有效,且成本较低。

在上变频传输技术的被动综合孔径成像系统中,电光调制器是关键的一个器件,它将目标信号通过电光效应转换到光载波中,然后通过光纤传输,将电信号和光信号联系起来。根据理论分析,在被动综合孔径成像系统中,进入电光调制器的辐射信号对光波是振幅调制(AM),调制后的光信号经滤波后得到第一级边带光波,最后通过该光波进行相干成像^[7]。理论分析可知,实现振幅调制电光调制,要求调制信号满足小信号近似。在被动综合孔径成像探测中,由于物体的自然辐射水平非常小,调制后的边带信号过于微弱而给成像探测带来很大的困难。在实际系统中,为了提高调制后的第一级光波边带功率,需对接收的辐射信号先放大,再进入电光调制器。因此,设置合适的输入调制功率非常重要。目前,关于电光调制器的研究与应用都集中在光通信方面,且调制信号均为大信号电光调制。因此,不能采样传统的电光相位调制理论和电光强度调制理论进行分析,必须重新讨论被动综合孔径成像中的电光调制理论和方法。

2 基于上变频的被动综合孔径成像技术

2.1 传统被动综合孔径成像原理

传统的被动综合孔径阵列成像探测的原理是:天线阵接收到的地面辐射信号在经过天线阵列中的

两两天线的复相关,得到可视度函数 $V(u, v)$,在远场条件,与视场(FOV)的亮温 $T(\xi, \eta)$,正好形成一对傅里叶变换,可通过求解这个复相关结果来反演出视场的亮温^[1~3]。

如图1所示, oxy 是视场坐标系, OXY 是天线阵坐标系,距视场的距离是 Z ,地面亮温是 $T(t, x, y)$ 。

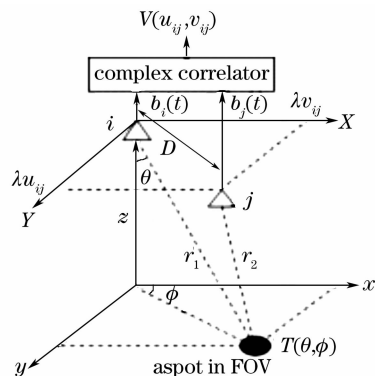


图1 传统对地观测二元干涉仪示意图

Fig. 1 Traditional two-element interferometer of earth observation

当天线阵列与视场之间的距离满足远场条件,根据传统基于下变频技术的被动综合孔径阵列成像理论,任意两天线信号的互相关可表示为^[2]

$$V(u_{ij}, v_{ij}) = K \iint_S F(\xi, \eta) T(\xi, \eta) \times \exp[-j2\pi(u_{ij}\xi + v_{ij}\eta)] dS, \quad (1)$$

式中 u, v 是天线坐标差值对波长的归一化,

$$u_{ij} = (X_i - X_j)/\lambda, \quad v_{ij} = (Y_i - Y_j)/\lambda,$$

K 是一个积分常量; X_i, Y_i 都是天线对应的坐标; (ξ, η) 是在天线坐标 (X, Y) 处视场的余弦方向,对应 $(\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi)$; $F(\xi, \eta)$ 为天线 i 和 j 的合成方向函数。从(1)式可得,任意两根天线之间进行复相关得到的可视度函数 $V(u, v)$ 与视场中的亮温 $T(\xi, \eta)$ 形成了一对傅里叶变换对。因此,从复相关的结果进行逆傅里叶变换可得到原视场的亮温分布,由于实际计算时都是离散化进行的,所以

$$\hat{T}(\xi_p, \eta_q) = \sum_k \sum_l \omega(u_k, v_l) V(u_k, v_l) \times \exp[j2\pi(u_k\xi_p + v_l\eta_q)], \quad (2)$$

式中 (ξ_p, η_q) 为视场中任意一点的坐标, $\omega(u, v)$ 为一窗函数。

2.2 基于电光调制技术的被动综合孔径成像

上变频被动综合孔径成像二元系统如图2所示。天线接收辐射信号 $E(\theta, t) \cos(\omega_{RF}t + \phi)$, 通过与本振(LO)系统进行混频后变为中频信号 $E_{IF} = E(\theta, t) \cos[\omega_{IF}t + \phi]$, 然后经过放大器放大信号,再

进入电光调制器对光束进行调幅；各通道的光载波由同一激光器提供，因此各通道中被调制的光信号是相干的；在光纤末端，透镜阵列对光波信号进行准直和扩束，在透镜阵列后运用光学系统进行光信息

处理，得到输出的光信号的复振幅总和，再由透镜焦平面上的面阵 CCD 直接探测其光强度，进行光电转换，得到被探测的目标图像。

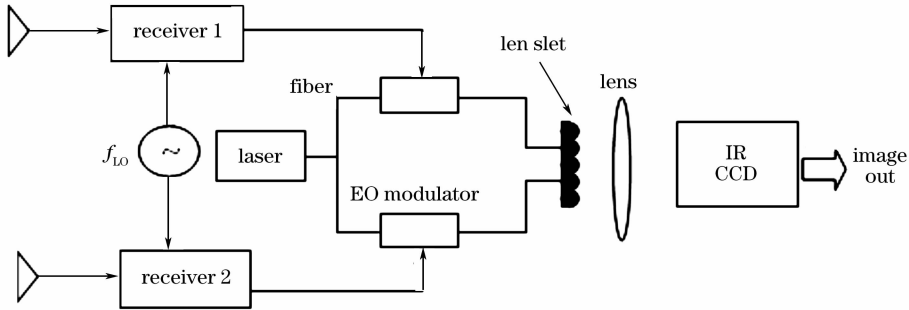


图 2 基于电光调制的被动二元成像探测系统简图

Fig. 2 Passive two-element imaging and detection system based on electric-optical modulation

设激光器输出的光波为单频 ω_{opt} , E_{RF} 为光波电场振幅; ϕ_{opt} 为光波电场的初始相位, 利用天线接收信号的中频输出对光波进行幅度调制, 其数学过程如下^[7]:

$$\begin{aligned}
 E_{AM} &= (E_{IF} + A_0)E_{opt} = E_{IF}E_{opt} + A_0E_{opt} = \\
 &A_0E_{RF}\cos(\omega_{opt}t + \phi_{opt}) + E_{RF}E(\theta, t)\cos[\omega_{IF}t + \phi]\cos(\omega_{opt}t + \phi_{opt}) = \\
 &A_0E_{RF}\cos(\omega_{opt}t + \phi_{opt}) + E_{RF}E(\theta, t) \times \\
 &\{\cos[(\omega_{opt} - \omega_{IF})t + \phi_{opt} - \phi] + \cos[(\omega_{opt} + \omega_{IF})t + \phi_{opt} + \phi]\}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

第一部分为光载频, 不包含任何有用信息; 第二步分和第三部分为调制后的光波的两个边带, 包含了中频信号的幅度和相位信息。如果利用单边带调制或光纤滤波器, 则可使调制信号中只含有其中一个边带。

由光纤出来的光波经过微透镜阵列阵, 产生类似阵列孔径的衍射效应。分析其中的一个边带——下边带(LSB)经过系统在 CCD 上成像的情况。下边带电场为

$$E_{LSB} = E_{RF}E(\theta, t)\cos[(\omega_{opt} - \omega_{IF})t + \phi_{opt} - \phi]. \tag{4}$$

对比原信号, 发现 E_{LSB} 仅仅是相位发生了一个线性的平移, 振幅加上了一个常数, 原来辐射场的

信号被转化到光波中。由射频接收天线组成的天线阵列, 通过这种转换方式, 信号变成了由光纤组成的阵列, 再运用光综合孔径直接成像方法处理, 可得到原辐射场的亮温图像。光纤末端所形成的平面阵列, 布局方式与天线阵完全相同, 但按一定比例缩小。在透镜焦平面处放置面阵 CCD 成像器件, 完成光电转换成像。对于点源, 只需分析其在天线中的相位信息在系统中的传输与处理, 图 3 表示了相位的传输过程。

如图 3 所示, 两根天线距离为 D , 点源入射波面与天线阵列平面夹角为 θ , 则天线接收的时间差为 $\Delta t = D\sin\theta/c$, 从而相应地在两个通道信号中引入相

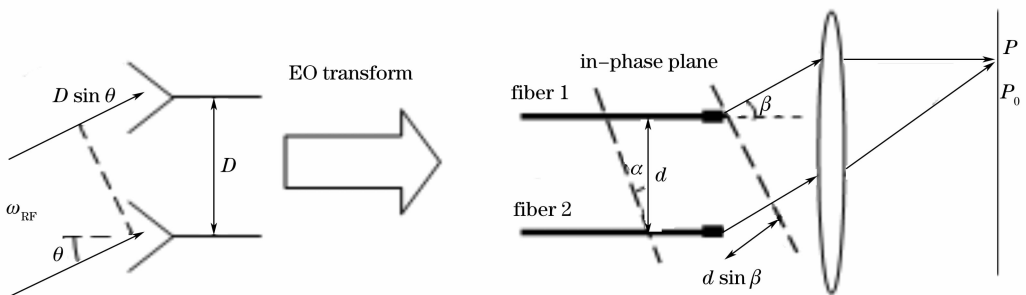


图 3 电光调制过程中的相位传输

Fig. 3 Phase transmission in EO modulation

位差:

$$\Delta\phi = \omega_{\text{RF}} \Delta t = \omega_{\text{RF}} \frac{D \sin \theta}{c}, \quad (5)$$

$\Delta\phi$ 最终也被分别保持到被调制后的两路光波的下边带中。

接收机中的相位信息通过电光调制后, 转换到被调制的光束中。在光纤的末端, 两路下边带的相位差也为 $\Delta\phi$, 在由该两路光纤组成的光综合孔径干涉成像系统中, 位置为 β 的出射光束产生的光程差为 $d \sin \beta$, 在垂直于 β 方向的平面上引入的相位差为

$$\Delta\phi' = d\omega_{\text{LSB}} \sin \beta / c. \quad (6)$$

从而在垂直于 β 方向的光束总的相位差为

$$\Delta\phi_{1,2} = \Delta\phi' - \Delta\phi. \quad (7)$$

根据光的相干理论, 当相位差为 2π 的整数倍时, 会出现干涉亮纹, 即 $\Delta\phi_{1,2} = 2\pi k$ (k 为任意整数, 表示条纹的级数), 则(7)式变换为

$$\sin \beta = k \frac{2\pi c}{d\omega_{\text{LSB}}} + \sin \theta \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_{\text{LSB}}}. \quad (8)$$

由于零级条纹(即 $k=0$)集中了绝大部分光能, 其中心为目标的几何像点, 其原理类似于夫琅禾费衍射中的斜入射情况。因此有

$$\sin \beta = \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_{\text{LSB}}} \sin \theta. \quad (9)$$

通过选择调制光束的频率 ω_{opt} 和 d 的大小, 可实现 $\omega_{\text{LSB}} d = \omega_{\text{RF}} D$ 。由于 $\Delta\phi' = \Delta\phi$, 最终实现 $\beta = \theta$, 补偿了在天线接收端引入的相位差, 则 β 方向的平行光在波阵面上无光程差。通过透镜在其后焦平面 P 处形成零级衍射斑, 即目标的位置和其在图像中的位置在任何地方都是等比例的。当 $\omega_{\text{LSB}} d = \omega_{\text{RF}} D$ 不满足时, 在不同的入射方向上的缩放比例不同, 需在接收后进行相应的校正处理才可得到和目标完全相对应的图像。

不同位置的目标所发射的毫米波波前相对于天线阵的角度 θ 不同, 转变为光信号后, 光纤末端主光线相对于主轴的角度 β 也随之不同 ($\beta = \theta$), 即衍射斑在焦平面上的位置不同, 可达到分辨目标的目的。

3 电光调制技术在综合孔径成像探测中的应用

3.1 电光调制基本模型

在上变频被动综合孔径成像系统中, 要求进入电光调制器的目标辐射信号对光波是振幅调制, 经调制后的信号进行载波抑制, 最后通过调制后第一

级边带光波进行相干成像。为分析视场目标辐射信号在经过电光调制器后的情况, 首先建立电光调制器的理论模型。根据马赫-曾德尔干涉型电光相位调制器, 建立如下调制模型。

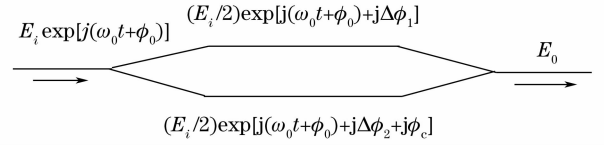


图4 马赫-曾德尔电光调制器模型

Fig. 4 Model of Mach-Zehnder EO modulator

图4中 E_0 为调制器输出光场, ϕ_c 是两个干涉臂的固定相位差, $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 分别是每个干涉臂上由于调制电场所引起的相位差

$$\Delta\phi_i = m_i E(t) = m_i E_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_{\text{RF}}), \quad (10)$$

$$i = 1, 2$$

m_1 、 m_2 分别为调制器两个臂的相位调制常量, λ 为输入光波波长, 运用初始相位 ϕ_{RF} 、幅度为 E_{RF} 、调制频率 ω_{RF} 的正弦调制。则调制后总输出光为

$$E_0 = \frac{E_i}{2} \exp\{j(\omega_0 t + \phi_0)\} \times$$

$$\{\exp[jm_1 E_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_{\text{RF}})] +$$

$$\exp[jm_2 E_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_{\text{RF}}) + j\phi_c]\}. \quad (11)$$

在一般的电光相位调制器中, $m_1 = m_2 = m$, $\phi_c = 0$, 从而得到相位调制器输出的光波电场为

$$E_0 = E_i \exp\{j(\omega_0 t + \phi_0) + jm E_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_{\text{RF}})\}. \quad (12)$$

3.2 电光调制器小信号近似

根据 Jacobi-Anger 展开

$$\exp\{jx \cos(\theta)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(x) \exp(jn\theta), \quad (13)$$

其中 $J_n(x)$ 表示第 n 阶贝塞尔函数。(12) 式可表示为

$$E_0 = E_i \exp[j(\omega_0 t + \phi_0)] \times$$

$$\exp[jm E_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_{\text{RF}})] =$$

$$E_i \exp[j(\omega_0 t + \phi_0)] \times$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(m E_{\text{RF}}) \exp[jn(\omega_{\text{RF}} t + \phi_{\text{RF}})] =$$

$$E_i \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(m E_{\text{RF}}) \times$$

$$\exp\{j[(\omega_0 + n\omega_{\text{RF}})t + (\phi_0 + n\phi_{\text{RF}})]\}. \quad (14)$$

由(14)式可知, 电光相位调制后的光波的频谱分布在 $\omega_0 + n\omega_{\text{RF}}$, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 且各频率分量的幅度为对应的第 n 阶第一类贝塞尔函数。将调制器输出光波通过通带在 $\omega_0 + \omega_{\text{RF}}$ 处的光学滤波器, 得到

频率为 $\omega_0 + \omega_{\text{RF}}$ 第一级分量边带分量。根据贝塞尔函数的近似,对于满足 $mE_{\text{RF}} \leq 1$ 的调制电压信号,通过光滤波器后的光波电场为

$$E_{\text{ofSB}} = jE_i J_1(mE_{\text{RF}}) \times \exp\{j[(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})t + (\phi_0 + \phi_{\text{RF}})]\} \approx \frac{1}{2} j m E_i E_{\text{RF}} \times \exp\{j[(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})t + (\phi_0 + \phi_{\text{RF}})]\}, \quad (15)$$

即为辐射信号对光波的振幅调制。该光信号通过光纤传输,最终在光纤末端形成阵列,并经过透镜阵列准直和扩束,在透镜阵列后运用光学系统进行光信息处理,得到输出的光信号的复振幅总和,再由透镜焦平面上的面阵 CCD 直接探测其光强度,进行光电转换,得到被探测的目标图像,从而实现高分辨力实时的被动综合孔径成像探测目的。

在基于上变频传输技术的被动综合孔径成像系统中,电光调制器是整个系统中最为关键的器件。一般被动辐射信号功率在 fW 到 nW 量级^[8,9],当直接用辐射信号调制时,所得到的第一级边带功率非常小,甚至无法探测到。对于某一确定的调制器,可通过提高输入光功率或调制功率来提高调制后的边带功率,但调制器的输入光功率也有限制。而对辐射信号进行放大后再调制可以很好地解决上述问题。随着调制信号的增大,需考虑式(15)对第一类 1 阶贝塞尔函数近似对系统造成的误差,设相对误差为 Δ ,则

$$\Delta = \left[\frac{1}{2} m E_{\text{RF}} - J_1(m E_{\text{RF}}) \right] / J_1(m E_{\text{RF}}), \quad (16)$$

Δ 与 (mE_{RF}) 之间的关系如图 5 所示。

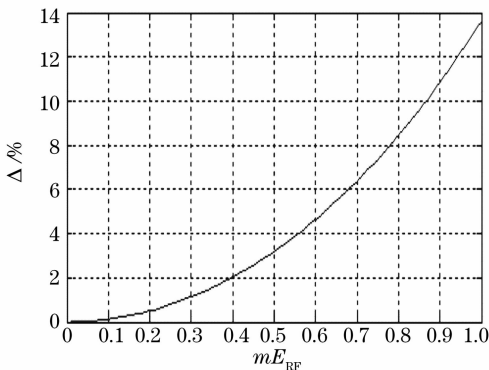


图 5 对第一类 1 阶贝塞尔函数近似后对系统造成的误差

Fig. 5 Error induced by the approximation of the first kind of Bessel function

从图 4 可以看出,随着 mE_{RF} 的增大,(16)式的结果误差越来越大,因此必须控制输入的调制电场在一定范围内,即控制输入电压的大小。根据

$$mE_{\text{RF}} = \frac{\pi n^3 r L}{\lambda} E_{\text{RF}} = \frac{\pi n^3 r L}{d \lambda} V_{\text{RF}}, \quad (17)$$

式中 n 、 r 为寻常光折射率和电光晶体折射率, $E(t)$ 、 $V(t)$ 为调制电场强度和调制电压, d 为电极宽度, L 为电场在电光晶体的作用长度。据电光调制器半波电压定义可得到

$$mE_{\text{RF}} = \frac{\pi n^3 r L}{d \lambda} V_{\text{RF}} = \pi \frac{V_{\text{RF}}}{V_{\pi}}. \quad (18)$$

由于 Δ 与 mE_{RF} 是一一对应,对于某一个确定误差值 Δ ,对应一个确定的 mE_{RF} ,因此输入最大调制电压为

$$V_{\text{RF}} = \frac{mE_{\text{RF}}}{\pi} V_{\pi}. \quad (19)$$

可通过数值计算得到不同的误差 Δ 范围内的最大调制电压。表 1 给出了部分计算结果。

表 1 不同误差值下对应的最大调制电压与半波电压比

Table 1 Ratio of maximal modulation voltage with half-wave voltage at different errors

$\Delta / \%$	0.1	0.5	1	5	10
V_{RF}/V_{π}	0.0283	0.0637	0.0898	0.1981	0.2760

实验中,电光调制器为 EO-Space 公司的一款商用 40 Gb/s 的电光相位调制器,输入阻抗 $Z_{\text{in}} = 50 \Omega$,半波电压 $V_{\pi} = 5.0 \text{ V}$ 。调制信号为由矢量网络分析仪输出的 35 GHz 的毫米波,在匹配输入条件下,当要求第一边带的振幅误差 Δ 控制在 1% 以内,可计算出输入到调制器的功率为 16 dBm。

3.3 计算与仿真分析

为验证在 1% 振幅误差情况下的被动综合孔径成像探测,采用二维圆周阵列进行仿真分析。以 25 根天线为例,为了得到无冗余的均匀 $u-v$ 覆盖效果,利用 Cornwell 等人提出的目标函数^[15],采用遗传算法对圆周阵列进行优化^[16],得到天线阵列的位置如表 2 所示。

取天线的工作频率为 $f = 650 \text{ GHz}$,接收机中频输出为 35 GHz,对位于 $\theta = 0$ 的点源目标进行成像仿真。在仿真中,取圆周直径为 $D = 0.5 \text{ m}$,天线阵列与目标距离 $Z = 100 \text{ m}$ 。图 6(a)为传统电相关处理方法所得的点扩展函数仿真图。根据上变频成像理论,将接收机输出的中频信号运用电光调制器转换为在光纤中传输的光信号,形成光纤阵列,最后进行光综合孔径成像。图 6(b)为使用了电光调制技术后通过光学信息处理得到的点扩展图^[15],其中光纤阵列圆周直径为 $d = 15 \text{ mm}$,光纤纤芯直径 $a = 50 \mu\text{m}$,准直后的光束直径为 $a' = 0.5 \text{ mm}$,光波波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。

表 2 16 根天线阵列优化排列位置
Table 2 Position of 16 optimized antennas

Position of antenna /rad	0	0.3637	1.1578	0.9168	2.1016	1.6465	2.3575	2.7215
	3.2392	3.8945	3.6721	4.4454	5.0810	4.7383	5.5915	6.0291

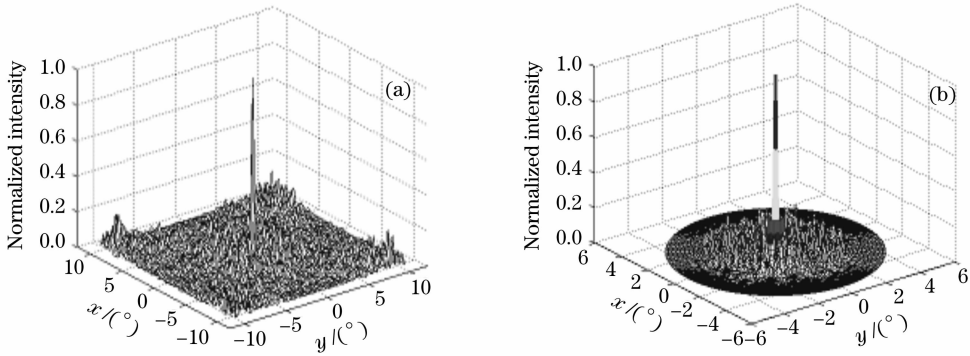


图 6 16 根天线按照圆周阵列排列成像的点扩展函数
Fig. 6 Point-spread-function of 16 antennas in a circle array

基于下变频的电相关和傅里叶变换的处理所得到的图像和基于上变频的电光调制技术和光学信息处理所得到的图像都恢复了点源的图像。同时,两图中点源的半峰全宽分别为 0.3534° 和 0.2266° ,说明当调制器近似导致误差在 1% 时,通过上变频技术所得到的图像的清晰度更好。综合孔径成像中图像信噪比^[17],分别为 -1.034 dB 和 -0.655 dB,因此采用电光调制技术的综合孔径成像的信噪比相对传统技术有所提高。

4 结 论

通过对综合孔径成像探测的两种处理方法——基于下变频的电相关和傅里叶变换方法和基于上变频的光学信息处理方法的理论分析,建立针对通过电光调制器的上变频模型,并分析了相位调制器的小信号输入近似,得到满足基于上变频技术综合孔径成像的结果。同时,通过对小信号近似的误差的量化讨论,推导出在不同误差时的最大调制电压的限制关系。结果表明,小信号近似误差在 1%,输入的调制功率为 16 dBm 时,利用上变频电光调制技术和光信息处理,对位于原点的点源所得到的成像仿真图的半峰全宽和信噪比性能都优于传统的基于下变频技术的成像仿真结果。

参 考 文 献

- 1 Christopher S. Ruf, Calvin T. Swift, Alan B. Tanner *et al.*. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth [J]. *IEEE Trans. GRS*, 1988, **26**(5): 597~611
- 2 Markus Peichl, H. Suess, M. Suess. Microwave imaging of the

- brightness temperature distribution of extended areas in the near and far field using two-dimensional aperture synthesis with high spatial resolution[J]. *Radio Science*, 1998, **33**(3): 781~801
- 3 Jiang Yuesong, You Rui. Synthetic aperture millimeter-wave camera of airborne for earth observations: Principles and configurations of antenna array[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, **19**(6): 431~436
- 江月松,尤睿. 机载毫米波合成孔径对地观测相机:原理和天线阵列构型[J]. *遥感技术与应用*, 2004, **19**(6): 431~436
- 4 A. R. Harvey, R. Appleby. Prospects for mm-wave aperture synthesis from space-borne and aerial platforms [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4091**: 27~38
- 5 Adriano José Camps Carmona. *Application of Interferometric Radiometry to Earth Observation* [M]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1996
- 6 John F. Federici, Dale Gary, Brian Schulkin *et al.*. Terahertz imaging using an interferometric array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(12): 2477~2479
- 7 P. M. Blanchard, A. H. Greenaway, A. R. Harvey *et al.*. Coherent optical beam forming with passive millimeter-wave arrays[J]. *J. Lightwave Technology*, 1999, **17**(3): 418~425
- 8 C. A. Schuetza, M. S. Mirotznik, S. Shia *et al.*. Applications of optical upconversion to sparse aperture millimeter-wave imaging[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5989**: 59891C1
- 9 C. A. Schuetz, R. D. Martina, I. Biswas *et al.*. Sparse aperture millimeter-wave imaging using optical detection and correlation techniques[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6548**: 65480B1
- 10 Jiang Yuesong. Size effects of sub-aperture on imaging of linear array of optical synthetic aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1042~1047
- 江月松. 直线阵光学综合孔径成像中的子孔径尺寸效应[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1042~1047
- 11 Chen Haiting, Jiang Yuesong, Zhong Yu. Study of optimization and imaging properties of two-dimensional circle array for optical synthetic aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1616~1622
- 陈海亭,江月松,钟宇. 二维圆周光综合孔径阵的优化排列及其成像特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1616~1622
- 12 Wang Haitao, Zhou Bifang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109~1115
- 王海涛,周必方. 光学综合孔径望远镜阵的光束组合器 [J]. *光*

学学报, 2002, **22**(9): 1109~1115

13 Mao Qianmin, Fan Weijun. Optical aperture synthesis space explore wave front interference theory research [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 881~884
毛谦敏, 范伟军. 光学综合孔径空间探索波前干涉理论研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 881~884

14 Chen Fushen. *Integrate Electro-Optic Modulation: Theory and Technology* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995
陈福深. 集成电光调制理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995

15 T. J. Cornwell. A novel principle for optimization of the instantaneous Fourier plane coverage of correlation arrays [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, **36**(8): 1165~1167

16 He Yuntao, Jiang Yuesong. Optical synthesis aperture circle-array optimization based on genetic algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1612~1616
何云涛, 江月松. 基于遗传算法的光综合孔径圆周阵优化与成像研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1612~1616

17 Kenneth P. Walsh, Brian Schulkin, Dary Gary *et al.*. Terahertz near-field interferometric and synthetic aperture imaging [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5411**: 9~17

书 讯

由浙江大学信息学院光电系教授、博士生导师、浙江大学微系统中心首席科学家、浙江省光学测试学会副理事长杨国光教授主持编著的国内首部系统阐述微光学领域的新理论、新技术、新方法以及新系统的学术著作《微光学与系统》近日由浙江大学出版社出版发行。

微光学研究的尺度已接近或小于光波长, 常规光学的理论与冷加工技术已完全不适应。杨国光教授及其领导的研究小组在国内较早开展了微光学与系统方面的研究, 取得了重要的科研成果。本书内容主要取材于编著者近 15 年来在微光学领域所承担的国家重大科研项目研究成果, 同时还参考了国内外同行的诸多最新研究成果, 以全新的微光学理论及光学微细加工技术为基础来阐述微光学器件及系统的设计与工艺技术, 在基础理论、设计方法、制作工艺、系统技术等各个环节进行了详细而准确的阐述。该专著涵盖面广, 特别是在折/衍混合光学系统上, 全面阐述了折/衍混合、多层、谐衍射等不同方法的优点之所在, 并给出具体的设计实例, 内容新颖。另外, 针对光通信系统中的若干微光学关键器件, 包括阵列波导光栅 (AWG)、波分复用系统 (WDM)、波长可变光源等, 以及微系统中的光技术, 进行了详细的阐述。该专著内容丰富, 适合光学工程、应用物理、先进制造、光通信、微系统等众多领域的研究人员参考用。

该书为国家“十一五”重点图书, 并得到国家科技出版基金的资助。

ISBN 978-7-308-05833-9 出版日期: 2008 年 3 月 定价: 68.00 元

浙江大学出版社 (<http://www.zjupress.com> 电话: 0571-88925592)

