

文章编号: 0253-2239(2010)07-2130-06

被动综合孔径光子成像空间分辨率分析

何云涛 江月松 张跃东 刘 丽

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要 分析了被动天线阵列接收信号在成像系统中的相位传输过程,并将被动综合孔径光子成像与光综合孔径成像做对比研究,利用阵列缩比因子定义了成像系统的空间分辨率因子;分别通过对天线阵列分辨率和光纤阵列的空间分辨率的分析,深入讨论了缩比因子和空间分辨率因子对整个成像系统分辨率的影响,推导出空间分辨率的计算公式;通过仿真计算和分析,研究了天线接收辐射方向和缩比因子对空间分辨率因子的影响,以及二者对成像系统空间分辨率的综合影响,讨论了空间分辨率有关结论在被动综合孔径光子成像系统设计中的意义。

关键词 综合孔径;空间分辨率;阵列缩比因子;光子成像

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.2130

Spatial Resolution of Passive Synthetic Aperture Photonic Imaging

He Yuntao Jiang Yuesong Zhang Yuedong Liu Li

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The phase transmission process of received radiation signals is analyzed. And the passive synthetic aperture imaging is compared with traditional optical synthetic aperture imaging, and the spatial resolution factor is defined based on array scaling factor. By the study of spatial resolutions of the antenna array and the fiber array, the influence of spatial resolution factor and array scaling factor on the spatial resolution in whole imaging system are discussed, and the spatial resolution equation is deduced for passive synthetic aperture imaging systems. Then the influences of array scaling factor and received radiation direction on the system's spatial resolution are investigated respectively by simulations and calculations. In the end, the significances of the research results about the spatial resolution are emphasized in designing passive synthetic aperture photonic imaging systems.

Key words synthetic aperture; spatial resolution; array scaling factor; photonic imaging

1 引 言

被动综合孔径成像技术一直是国际上的研究热点之一,其研究的工作波段覆盖了从微波到太赫兹波的全部波段。通过机载和星载平台,该技术被广泛应用于遥感与成像,环境、大气和海洋监测等,发挥巨大的经济和社会效益^[1~3]。在军事上更是受到广泛和深入的研究和应用,特别是美国和欧空局(ESA)都投入巨资用于研究和建立对地观测和侦察的被动综合孔径成像系统^[4~6]。

由于传统的下变频被动综合孔径成像系统受硬

件的体积、重量和信号处理速度等因素的限制^[7~9],自 2002 年以来,研究人员将目光转向光学信息处理技术:利用光学信息处理技术来处理天线所接受的辐射信号,通过光学相关计算,可以实现对综合孔径系统的实时成像,这也即是近年来开始研究的被动综合孔径光子成像技术^[7~11]。其基本原理是通过将接收到的辐射信号经电光调制技术加载到光波上,并利用光载波干涉或冗余基线校正算法进行光纤系统的相位误差控制,最终利用调制后的边带光束形成阵列进行光学成像,从而得到目标的温度分

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-9-21

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z114)和北京航空航天大学博士创新基金(2008 年度)资助课题。

作者简介: 何云涛(1982—),男,博士研究生,主要从事被动综合孔径成像方面的研究。

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

导师简介: 江月松(1959—),男,博士,教授,主要从事红外、光电子、激光及其成像与探测技术等方面的研究。

E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

布图^[7]。

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,则可采用光学综合孔径成像技术^[12~14],在光波频率上直接成像,无需解调出毫米波信号;与传统的综合孔径成像系统相比,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级数增长),代之以高效的光学系统,整个设备简单而实用,且成本较低。

1999年,英国的 Greenaway 初步论证了这种方法的可行性,同时美国的 Kinvin 建立了 8 路的线性阵列,并通过冗余基线校正(RSC)技术进行相位控制,已经实现了成像^[7,8]。美国的 Prather 等^[9,11]建立了 4 路的线性阵列,正在搭建圆面阵列的二维电光成像阵列。

目前,被动综合孔径光子成像技术的研究方向主要集中在阵列设计、调制器性能研究、相位误差提取与控制以及温度灵敏度提高等几个方面,而空间分辨率也是其中的一个重要研究方面^[15]。根据被动综合孔径成像原理,系统的空间分辨率是由最大基线长度和天线的中心波长决定的^[4]。在被动综合孔径光子成像系统中,由于阵列的大小和工作频率都发生了变化,整个电光成像阵列的分辨率将不再完全由前端的阵列的分辨率确定,还受缩比光纤阵列的约束。同时,成像的分辨率还会随天线接收电磁波方向的不同而相应地改变。此前,文献^[11]已经提出了利用“缩比因子”来解释成像系统中天线阵列接收辐射方向与光纤阵列中出射光波零级条纹方向的关系,以及天线阵列视场角大小与光纤

阵列视场角的关系。但目前还没有发现深入分析被动综合孔径光子成像系统中,天线阵列转换到光纤阵列系统后系统分辨率的变化的有关文献。

为了说明系统真实分辨率,本文进一步分析缩比因子对于整个系统分辨率的影响,特别是对来自不同辐射方向的目标,整个成像系统的分辨率随着缩比因子的变化情况。

2 综合孔径电光阵列成像原理

基于光学上变频的被动综合孔径光子成像系统原理如图 1 所示:天线接收目标的辐射和散射信号,经过放大器(LNA)放大后,进入电光调制器(EOM)对光纤中的光载波进行调制;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^[7]。

当中心频率为 ω_{RF} 的天线接收信号后,对频率为 ω_{opt} 的光载波进行调制。调制后的光信号包含 2 部分:1)为光载波,不含任何有用信息;2)为光载波调制后的各级边带,包含了天线接收到的信号幅度和相位。利用带阻型光纤滤波器,可以使得调制后的信号中只含边带信号。通过对调制后的光信号的下边带(LSB)分析可知,LSB 信号相对天线接收的信号,振幅成正比,相位发生了线性平移,即原天线接收的信号被转化到光波中。对方向为 θ 的目标辐射信号,只需分析其相位在系统中的传输与处理过程。

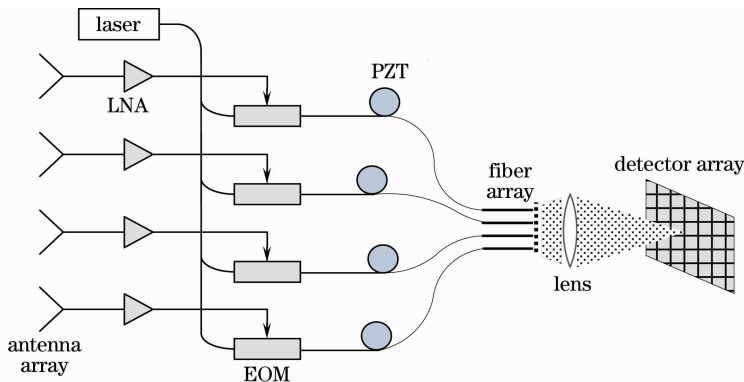


图 1 被动综合孔径光子成像原理图

Fig. 1 Diagram of passive synthetic aperture photonic imaging

如图 2 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 $\Delta t = D \sin \theta / c$, c 为光速,最终在两个通道信号中引

入相位差为

$$\Delta\phi = \omega_{RF} \Delta t = \omega_{RF} \frac{D \sin \theta}{c}. \quad (1)$$

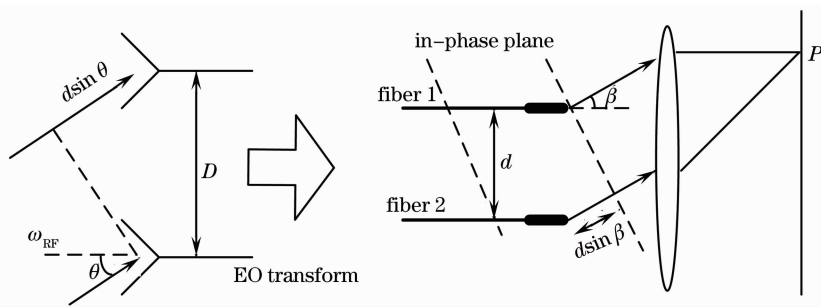


图 2 电光调制过程中的相位传输

Fig. 2 Phase transmission in EOM

根据分析, $\Delta\phi$ 最终被分别调制到相应光纤中的 LSB 中, 即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 LSB 的相位差仍为 $\Delta\phi$, 在由该两路光纤组成的光综合孔径干涉系统中, 位于 β 的衍射光束产生的光程差为 $d \sin \beta$, 则在垂直于 β 方向的平面上引入的相位差为

$$\Delta\phi' = \frac{d\omega_{\text{LSB}} \sin \beta}{c}. \quad (2)$$

因此, 最终在垂直 β 方向的平面上的 LSB 信号相位差 $\Delta\phi' - \Delta\phi$ 。根据光的相干理论, 当相位差为 2π 的整数倍时, 即 $\Delta\phi' - \Delta\phi = k2\pi$ (k 为任意整数, 表示相干条纹级数), 会出现干涉亮纹^[16], 由此可得

$$\sin \beta = k \frac{2\pi c}{d\omega_{\text{LSB}}} + \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_{\text{LSB}}} \sin \theta. \quad (3)$$

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

$$\sin \beta = \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_{\text{LSB}}} \sin \theta. \quad (4)$$

通过选择光载波的频率 ω_{opt} 和光纤阵列距离 d 的大小, 可实现 $\omega_{\text{LSB}} d = \omega_{\text{RF}} D$ 。由 $\Delta\phi' = \Delta\phi$ 可得 $\beta = \theta$, 表明位于 β 方向的衍射光束补偿了天线接收端引入的相位差, 即 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, 也即天线接收目标辐射方向和其在光纤阵列干涉成像中的位置方向相同。当不满足 $\omega_{\text{LSB}} d = \omega_{\text{RF}} D$ 时, 根据 (4) 式可知上述两个方向角度不相同, 故需对所得图像进行相应的几何校正方可得到和目标方向完全对应的图像。

3 分辨率分析

在传统被动综合孔径成像系统中, 天线接收目

标辐射信号后下变频至中频, 然后进行两两相关运算, 并对相位和幅度误差进行校正, 以得到目标的可视度函数, 最后通过逆傅里叶变换得到目标的亮温图。理论上, 系统的分辨率由天线的中心频率和合成阵列的口径大小确定。

对于本文所述的被动综合孔径光子成像系统, 由于成像过程中阵列的大小和工作频率都发生了变化——从天线阵列到光纤阵列, 因此整个成像系统的分辨率不仅受到接收天线阵列参数的影响, 还受到缩比光纤阵列参数的影响。

3.1 被动综合孔径光子成像系统等效说明

通过对被动综合孔径成像理论分析, 将含有目标相位信息和强度信息的光波叠加在一起积分可完成目标信息的互相关运算, 再经光学傅里叶变换系统便可得出目标的亮温图像。由于被动综合孔径光子成像和传统的光学综合孔径成像在光学成像方面类似, 为了便于研究成像系统的空间分辨率, 可将当前的综合孔径光子成像系统等效为一光综合孔径成像系统: 方向为 θ 的辐射信号进入天线阵列被等效理解为以方向 γ 入射的光波, 两者入射方向具有确定的比例关系。通过这种等效后, 可将所研究的空间分辨率问题转化到目前技术相对成熟的光综合孔径成像问题进行分析。

根据被动综合孔径光子成像原理, 从 θ 方向来的辐射信号, 经综合孔径天线阵列和接收机处理, 再经电光调制后形成光纤阵列, 最后进行光学空间相关成像, 整个过程可等效为一般光学综合孔径成像过程, 如图 3 所示。间隔为 D 的两天线接收 RF 后的相位信息被保留到光纤中, 即其相位差也同样被引入到光纤信号中, 故在间隔为 d 的光纤末端 LSB 的相位差为

$$\Delta\phi_{\text{LSB}} = \Delta\phi = \omega_{\text{RF}} \frac{D \sin \theta}{c}. \quad (5)$$

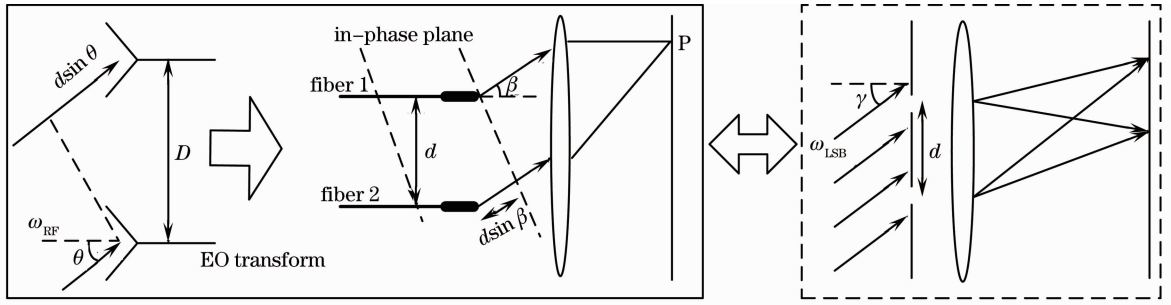


图3 对光综合孔径成像系统的等效比较

Fig. 3 Equivalent comparing to optical synthetic aperture imaging

该相位差可等效在光综合孔径中从 γ 方向入射的光波 ω_{LSB} 经间隔为 d 的两个子孔径进行干涉成像。其中,由 γ 在两子孔径处产生的初始相位差和 $\Delta\phi_{LSB}$ 有如下关系式

$$\frac{d\omega_{LSB} \sin \gamma}{c} = \Delta\phi_{LSB} = \omega_{RF} \frac{D \sin \theta}{c}, \quad (6)$$

简化得

$$\sin \gamma = \frac{D\omega_{RF}}{d\omega_{LSB}} \sin \theta. \quad (7)$$

因此,从 θ 方向来的辐射信号的综合孔径成像问题也就转换为对从 γ 方向来的平行光的光综合孔径成像问题,也即可以利用光综合孔径成像的方法来分析系统的分辨率。

3.2 光电阵列分辨率

由于被动综合孔径光子成像系统中包含天线阵列和光纤阵列两个阵列,因此系统的空间分辨率需综合考虑这两个阵列的空间分辨率。为方便讨论,以一维线性阵列为例,根据综合孔径成像原理,结合经典空间分辨率定义,可知其分辨率为^[4]

$$\Delta\xi = \frac{1}{u_{\lambda \max}} = \frac{c}{\omega u_{\max}}, \quad (8)$$

其中 $u_{\lambda \max}$ 为目标的空间频率最大采样点位置, u_{\max} 为最大基线长度, λ 和 ω 分别为阵列的工作波长和工作频率。由此,被动综合孔径光子成像系统中天线阵列和光纤阵列的分辨率分别为

$$\alpha_{RF} = \frac{c}{\omega_{RF} D}, \quad \alpha_{opt} = \frac{c}{\omega_{opt} d}. \quad (9)$$

式中参数定义如前文所述。根据(7)式,定义天线阵列与光纤阵列的缩比因子^[11]为

$$S = \frac{(\omega_{opt} + \omega_{RF})d}{\omega_{RF} D} \approx \frac{\omega_{opt} d}{\omega_{RF} D}, \quad (10)$$

则二者的分辨率之比为

$$\frac{\alpha_{RF}}{\alpha_{opt}} = \frac{\omega_{opt} d}{\omega_{RF} D} = S. \quad (11)$$

对于缩比因子为 S 的光电成像阵列,当天线接收辐射方向分别为 θ 和 $\theta + \Delta\theta$ 时,设其等效光综合孔

径阵列模型中,入射光波方向分别为 γ 和 $\gamma + \Delta\gamma$, 根据(7)式,存在如下关系式:

$$\sin \gamma = \frac{1}{S} \sin \theta,$$

$$\sin(\gamma + \Delta\gamma) = \frac{1}{S} \sin(\theta + \Delta\theta). \quad (12)$$

在(12)式中,当 $\Delta\theta$ 等于天线阵列分辨率 α_{RF} , 可计算出这两个进入天线的辐射方向在光综合孔径成像系统下的等效方向位置的差异大小。将所得方向差值与光纤阵列分辨率比较,定义其比值为被动综合孔径光子成像系统的空间分辨率因子 τ ,

$$\tau = \frac{\Delta\gamma}{\alpha_{opt}} = \frac{(\gamma + \Delta\gamma) - \gamma}{\alpha_{opt}} = \frac{\arcsin[\sin(\theta + \alpha_{RF})/S] - \arcsin(\sin \theta/S)}{\alpha_{RF}/S}. \quad (13)$$

1)若 $\tau \geq 1$, 即方向差值大于或等于所述的等效阵列空间分辨率,这表明刚好可被天线阵列分辨的两个辐射方向在等效光纤阵列中也可被分辨出,故天线阵列的空间分辨率就是整个成像系统的空间分辨率 α_{sys} , 即

$$\alpha_{sys} = \alpha_{RF}. \quad (14)$$

2)若 $\tau < 1$, 即方向差值小于所述的等效阵列空间分辨率,这表明天线阵列刚好可分辨的两个辐射方向在光纤阵列中无法被分辨,因此系统的空间分辨率只受到光纤阵列的空间分辨率的限制。此时,采用类似的方法,在(12)式中取 $\Delta\gamma = \alpha_{opt}$, 则可得到

$$\Delta\theta = (\theta + \Delta\theta) - \theta = \arcsin[S \sin(\gamma + \alpha_{opt})] - \arcsin(S \sin \gamma). \quad (15)$$

(15)式表明,两个在光纤阵列前刚可能被分辨的入射光方向所对应的天线阵列的辐射方向差异,即此时系统的空间分辨率

$$\alpha_{sys} = \Delta\theta = \arcsin[S \sin(\gamma + \alpha_{opt})] - \arcsin(S \sin \gamma). \quad (16)$$

综上所述,被动综合孔径光子成像系统的空间分辨率为

$$\alpha_{\text{sys}} = \begin{cases} \alpha_{\text{RF}} & \tau \geq 1 \\ \arcsin[S \sin(\gamma + \alpha_{\text{opt}})] - \arcsin(S \sin \gamma) & \tau < 1 \end{cases} \quad (17)$$

3.3 缩比因子和入射角对分辨率的影响

通过(17)式,可以计算出在不同缩比因子 S 和不同方向 θ 的辐射信号下成像系统的分辨率,但为了得到缩比因子 S 和辐射信号方向 θ 对系统分辨率的影响趋势,需要对(13)式做深入分析。对于一个最大基线为 u_{max} 的一维天线阵列,若阵列的缩比因子为 S ,根据定义可知对应的一维光纤阵列最大基线为 Su_{max} ,天线阵列和光纤阵列的角分辨率分别为 $\alpha_{\text{RF}} = \lambda_{\text{RF}}/u_{\text{max}}$ 和 $\alpha_{\text{opt}} = \lambda_{\text{opt}}/(Su_{\text{max}})$ 。以下对 $0 \sim \pi/6$ 视场角范围内对系统的空间分辨率作仿真分析。

3.3.1 辐射信号方向对角分辨率影响

图4分别给出 $S = 10, 1, 0.1$ 时所对应的辐射信号方向 θ 与空间分辨率因子 τ 的关系。

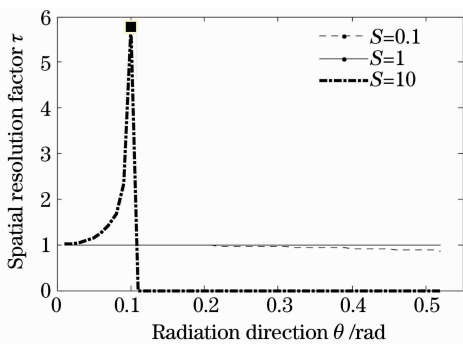


图4 分辨率因子 τ 与辐射信号方向 θ 关系图

Fig. 4 Influence of radiation direction on spatial resolution factor

在计算和画图过程中,发现当 $S = 0.1$ 时,按照(13)式计算的 τ 含有虚部,但在图中的最大值出现一个突变之前,比值仍然为实数,这是有意义的。但之后出现了虚部,这是因为在计算中含有超过设定的辐射方向 θ ,导致在光纤阵列成像时光纤末端主光线相对于主轴的角度 β 超过了 $\pi/2$,这显然是不符合实际情况,是没有意义的。因此,成像系统的视场角是 τ 在取得最大值时对应的辐射方向,为 θ_{max} 。

在 $S = 1$ 时,由于 $\omega_{\text{LSB}}d = \omega_{\text{RF}}D$,则通过透镜在其后焦平面形成零级衍射斑,最终实现 $\beta = \theta$,即 τ 恒等于 1,也即目标图像和经被动综合孔径光子成像所得图像是成线性比例的。

当 $S = 10$ (或其他大于 1 的值),根据(13)式可知 τ 恒小于 1,即天线阵列刚好可分辨的两个辐射方向在经光纤阵列成像后却无法分辨,此时成像系统的空间分辨率参照(16)式进行计算。

3.3.2 缩比因子对系统角分辨率影响

图5给出在 θ 分别取 $0, \pi/18$ 和 $\pi/6$ 时,系统的空间分辨率因子 τ 与缩比因子 S 的关系。

当 $\theta = 0$ 时,根据(13)式中可知 τ 恒等于 1,系统空间分辨率不受 S 影响。

在 θ 分别为 $\pi/18$ 和 $\pi/6$ 时, τ 在 $S < 1$ 的某个特定阈值 S_m 发生突变。当 $S < S_m$ 时,空间分辨率因子 τ 为复数,其原因类似于图4,当 S 小于阈值 S_m 时,等效的光学入射角已经超过了 $\pi/2$,但实际成像系统中不可能出现,是没有意义的;当 $S \geq S_m$ 时,空间分辨率因子 τ 随 S 的增大,从最大值逐渐减小,且所有的曲线都经过(1, 1)点,并在 $S = 1$ 的前后系统的分辨率因子分别出现 $\tau > 1$ 和 $\tau < 1$,空间分辨率按照(17)式计算。

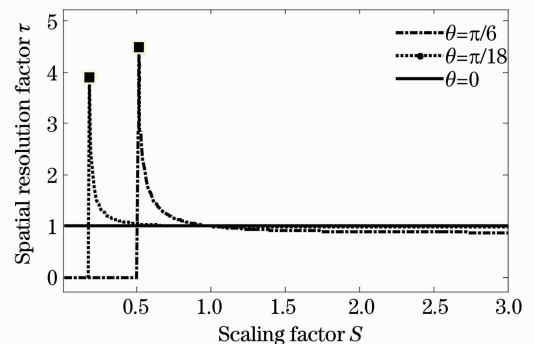


图5 分辨率因子 τ 与阵列缩比因子 S 关系图

Fig. 5 Influence of array scaling factor S on spatial resolution factor τ

3.3.3 辐射方向和缩比因子对空间分辨率的综合影响

图6是空间分辨率因子 τ 与天线接收辐射方向 θ 在 $S > 1$ 时的三维函数关系。当 $S = 1$ 或 $\theta = 0$ 时,空间分辨率因子 τ 恒为 1,说明系统的分辨率不会受到两个阵列任何影响;随着 S 和 θ 的增大, τ 逐渐减小,也即分辨率逐渐恶化,此时空间分辨率按照(16)式计算。

上述分析对于被动综合孔径光子成像系统的设计具有特别的意义:为了实现成像系统不受电光调制后光纤阵列成像对分辨率造成的影响,需要综合考虑天线的中心波长,天线阵列的合成孔径(最大基线),光载波波长以及光纤阵列合成孔径(最大基线)这四个因素,结合系统要求达到的视场范围综合考虑,最终实现系统的空间分辨率因子 $\tau \geq 1$,从而保

证天线阵列的空间分辨率不受影响。

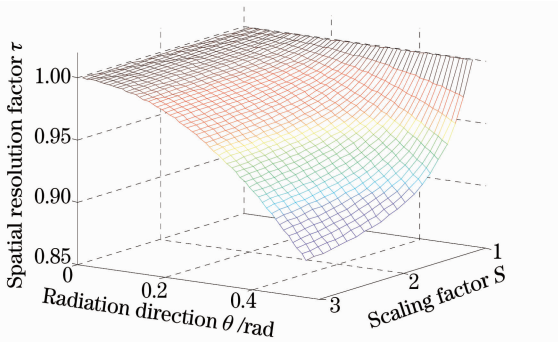


图6 辐射方向和缩比因子对空间分辨率的
三维函数关系图

Fig. 6 Function figure of radiation direction, scaling factor and spatial resolution factor

4 结 论

通过对被动综合孔径光子成像系统天线接收辐射信号的相位传输过程的分析,结合被动综合孔径成像基本原理,得到决定系统空间分辨率的四个参数:天线中心波长,天线阵列的合成孔径(最大基线),光载波波长,光纤阵列合成孔径(最大基线)。通过与传统光综合孔径成像系统的对比分析,得到了研究系统的等效成像系统,分析了阵列缩比因子,并在此基础上定义了影响系统空间分辨率的一个重要参数:空间分辨率因子,根据对空间分辨率因子的物理含义,推导出了被动综合孔径光子成像系统的空间分辨率公式。最后通过数值仿真分析,对影响空间分辨率因子的两个主要参数——天线接收辐射方向和阵列缩比因子,进行了深入分析,分别得到在不同条件下对应的空间分辨率计算公式。本文的研究结论对于被动综合孔径光子成像系统的设计具有一定约束和指导作用,即在系统设计的时候必须考虑到系统的空间分辨率的影响因素,而不至使系统的空间分辨率恶化。

参 考 文 献

1 C. S. Ruf, C. T. Swift, A. 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 A. R. Harvey, R. Appleby. Prospects for mm-wave aperture synthesis from space-borne and aerial platforms [C]. *SPIE*, 2000, **4901**: 27~38

3 A. Bandyopadhyay, A. Stepanov, B. Schulkin *et al.*. Terahertz interferometric and synthetic aperture imaging[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(5): 1168~1178

4 M. 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

5 D. L. Vine, C. T. Swift, M. Haken. Development of the synthetic aperture radiometer, ESTAR [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2001, **29**(1): 199~202

6 M. Peichl, S. Dill, M. Jirousek *et al.*. Microwave radiometry-imaging technologies and applications [C]. *WFMN07*, 2007, **WFMN07_IL_C1**: 75~83

7 P. M. Blanchard, A. H. Greenaway, A. R. Harvey *et al.*. Coherent optical beam forming with passive millimeter-wave arrays[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3): 418~425

8 Li Youzhi, Benjamin Braker, Friso Schlottau *et al.*. Broadband RF imaging and spectrum analysis using spatial-spectral hole-burning in an inhomogeneously broadened absorber[C]. *SPIE*, 2005, **5971**: 597122

9 C. A. Schuetz, J. Murakowski, G. J. Schneider *et al.*. Radiometric millimeter-wave detection via optical upconversion and carrier suppression[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(5): 1732~1738

10 He Yuntao, Jiang Yuesong, Wang Changwei. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1201~1207

何云涛,江月松,王长伟. 电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1201~1207

11 C. A. Schuetz, R. D. Martin, I. Biswas *et al.*. Sparse aperture millimeter-wave imaging using optical detection and correlation techniques[C]. *SPIE*, 2007, **6548**: 65480B1~65480B8

12 A. H. Greenaway. Optical aperture synthesis[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1991, **2**(1): 1~12

13 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

14 Wang Shengqian, Rao Changhui, Jiang Wenhan *et al.*. Analysis of spatial arrangement for optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 692~699

王胜千,饶长辉,姜文汉等. 四子孔径光学合成孔径成像系统空间排布性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 692~699

15 Thomas J. Karr. Resolution of synthetic-aperture imaging through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2003, **20**(6): 1067~1083

16 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics (Third edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 68~71

J. W. Goodman. 傅里叶光学导论(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2006. 68~71