第5卷 第2期　　电子科学学刊　　Vol. 5, No. 2
1983年3月　　JOURNAL OF ELECTRONICS　　Mar., 1983

合成孔径雷达中多普勒频移误差的光学补偿*

毛引芳
（中国科学院电子学研究所）

提　　要

本文分析了多普勒频移误差对合成孔径雷达成像的影响，并给出了对这一影响进行光学补偿的计算公式、实验方法、实验结果及误差分析.

一、引　　言

在一般机载合成孔径雷达（SAR）的原理性叙述中，都假定飞机是以等高、恒速、平行地面作直线飞行的. 但实际上难以作到如此理想化的飞行. 这是因为飞机本身的性能和大气湍流的扰动会影响飞机的飞行. 这是影响SAR成像质量的重要因素之一. 为此，在SAR中采用了天线伺服平台及运动补偿技术[1-3]. 但这里我们不讨论电子学补偿法，而讨论光学补偿法，因为对于SAR数据的成像处理，目前光学法比较实用，它可进行二维平行处理，容量又大，速度又快，经济简便，且精度也足够高. 文献[3]提到了对偏航角和俯仰角的光学校正问题，但没有作更广泛的讨论. 在本文中将讨论对于SAR更为普遍的多普勒频移误差对成像的影响及其光学补偿问题. 多普勒频移误差可能是由天线波束的指向误差及飞机横向速度扰动产生的，也可能是由在方位向加于信号的固定频率偏置及其它影响引起的. 应用相移定理等基本理论，得出了在SAR中为消除多普勒频移误差影响而进行光学补偿的计算公式及实验方法，并给出了实验结果及误差分析.

二、SAR中多普勒频移误差对成像的影响

多普勒频移误差的最严重的影响是使得回波信号的相位或频谱产生移动，从而造成方位向的成像误差. 通常，最大的多普勒频移误差源是天线波束的指向误差，而由飞机横向速度扰动引起的多普勒频移误差则是比较小的. 飞机的俯仰角、偏航角以及在方位向加于信号的固定频率偏置等都会反映为天线波束的指向误差. 如果波束相对于基准方向有α弧度的指向误差，则就会产生f_D的多普勒频移：$f_D = 2v\alpha/\lambda_r$，式中v是飞机速度，

* 1982年1月7日收到.

λ_r 是雷达波长．通常，指向误差 α 是一个随时间慢变化的函数．这样，在一个合成孔径的长度内，飞机运动的扰动函数可以被近似为一个线性的或二次的时间函数．如果在线性条件下，则它与飞机速度矢量有常数指向误差时一样，使来自点目标的一个所期望的多普勒频率附加上一个常数项的多普勒频移．在机载 SAR 中，可把记录在数据片上的天线方向图近似为一个矩形函数[2]：

$$h(x_f,\, r_f)=\mathrm{rect}\left\{\frac{x_f-[x_0-x_{py(r_0)}]/p}{r_0\beta/p}\right\},\tag{1}$$

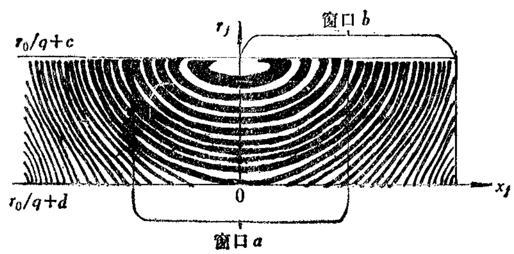
式中 β——天线波束角宽度；x_{py}——由于天线指向误差及飞机横向速度扰动等原因，波束在方位向产生的偏移距离；x_f，r_f——分别为记录在数据片上目标的方位和距离坐标；x_0，r_0——分别为点目标的方位和斜距坐标；p——方位向的缩尺因子．此外，记录在数据片上的辐射脉冲波形函数可写为[2]：

$$f\left\{\frac{2q}{c}\left[r_f-\frac{r_0}{q}-\frac{p^2}{2qr_0}\left(x_f-\frac{x_0}{p}\right)^2\right]\right\}=\mathrm{rect}\left[\frac{r_f-\frac{r_0}{q}-\frac{p^2}{2qv_0}\left(x_f-\frac{x_0}{p}\right)^2}{R/2q}\right]$$
$$\cdot\exp\left\{j\pi S\left(\frac{2q}{c}\right)^2\left[r_f-\frac{r_0}{q}-\frac{p^2}{2qr_0}\left(x_f-\frac{x_0}{p}\right)^2\right]\right\},\tag{2}$$

式中 c——光速；R——辐射脉冲的空间宽度；q——距离向缩尺因子；S——距离向的线性调频斜率．记录在数据片上点目标的反射信号 $g(x_f,\, r_f)$ 则是由记录在数据片上的天线方向图加权的辐射脉冲波形函数和一偏置项的迭加：

$$g(x_f,\, r_f)=b+\left\{\sigma h(x_f,\, r_f,\, x_0,\, r_0)f(x_f,\, r_f,\, x_0,\, r_0)\exp\left(j2\pi\frac{f_0}{v_c}r_f\right)\right.$$
$$\left.\cdot\exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda_r}\left[r_0+\frac{p^2}{2r_0}\left(x_f-\frac{x_0}{p}\right)^2\right]\right\}\right\}+c.\ c.,\tag{3}$$

式中 b——偏置项；σ——目标的反射率；v_c——记录波束的横向扫描速率；$c.\,c.$——为前一项的复数共轭项；f_0——距离向载波频率．



(a) $x_{PY}=0$　　(b) $x_{PY}\neq 0$

图 1　天线指向误差及飞机横向速度扰动对数据片上方位窗口位置的影响

Fig. 1　Effect of the antenna pointing error and the perturbation of the cross-track aircraft velocity on the position of the azimuth window on a data film

从 (1)—(3) 式可见，由于天线波束的指向误差及飞机横向速度扰动等影响，使得如图 1 所示的数据片上方位窗口的位置移动了一个距离，也就是使多普勒频谱产生了一个

附加的移动．这一方面使记录在数据片上的信号不再以 $x_f=0$ 轴对称；另一方面还改变了数据片的聚焦特性，使距离焦线产生弯曲，方位焦线产生倾斜．最终使重现时获得的微波图像畸变失真，像质变坏．

在第一个球面镜的后焦平面处，是输入信号分布经傅里叶变换后的谱平面．当有了天线指向误差及飞机横向速度扰动等影响时，中心在 $f_r=f_{0r}$ 附近的正一级区的输入信号幅度分布为[3]：

$$G_1(f_x,f_r-f_{0r})=c_1\sigma F\left[\frac{c(f_r-f_{0r})}{2q}\right]e^{-j2\pi(f_r-f_{0r})r_0/q}$$
$$h\left[\frac{f_x+2px_{py}/\lambda_r r_0}{-2p\beta/\lambda_r}\right]e^{\frac{j\pi q r_0 f_x^2}{p^2(f_r+2q/\lambda_r)}}e^{-j2\pi f_x x_0/p},\qquad(4)$$

式中 $f_x=x_2/\lambda_l F_{s1}$，是方位向的空间频率；$f_r=r_2/\lambda_l F_{s1}$，为距离向空间频率；x_2，r_2——分别为傅氏变换平面处的方位和距离坐标；λ_l——光波长；F_{s1}——第一个球透镜焦距；$f_{0r}=f_0/v_c$——空间距离偏置频率；c_1——常数．

从 (4) 式可见，有了空间距离偏置频率 f_{0r} 后，则距离向的频率就产生偏移．而天线指向误差及飞机横向速度扰动等对方位包络 h 的影响，是使双向天线幅度方向图沿 f_x 方向移动，即产生了一个附加的多普勒频移．这些偏移大大地增加了对相关器空间频率响应的要求．此外，在正常情况下，谱平面处的一级波与零级波之间方位向的间距 x_2 较小，但当附加的多普勒频移出现时，x_2 的尺寸就可能大大地增加．那些方位偏置大的数据片，当用准直光照明时其信号光波产生的衍射角也大．因此将该信号光波输入到光学处理系统时，需要相应地增大透镜的输入孔径，否则有时可能因输入孔径过小而失去部分信号．这些都是影响 SAR 图像分辨力及清晰度的因素．

三、光学补偿的原理和方法

从傅里叶变换的相移定理可知：一个函数在空域中的平移，将带来在频域中的线性相移[4]．在 SAR 中，当天线波束出现指向误差及横向速度扰动等影响时，天线波束角就会偏离其原来的定位中心．对 (3) 式中信号 g 的包络 h 来说，原定输入孔径的中心在 x_0/p 处，当上述影响出现时，其方位向的相位函数就变为：

$$\exp\left\{-j\frac{2\pi p^2}{\lambda_r r_0}[x_f-(x_0+x_{pya})/p]\right\},\qquad(5)$$

式中 x_{pya}——是 r_0 等于 r_{0av} 时 x_{py} 的偏移距离．从 (5) 式可见，相位函数的定位中心由 $x_f=x_0/p$ 移到了 $x_f=(x_0+x_{pya})/p$，即空域中所记录的相位函数有了 x_{pya}/p 的空间平移．这使得这函数在频域中有了 $\exp\{-j2\pi[(f_x x_{pya}/p)-f_x]\}$ 的线性相移，式中 f_x 为没有方位偏置时的方位空间频率．由全息学原理可知，一个记录函数在频域中的线性相移，是由于在空域中记录的该函数的数据波带片，用平行光照明时，信号光波的衍射角发生了改变．如图 2 所示，一级信号光波与光轴之间增加了一个 ϕ_{py} 的倾斜角．可以求得：

$$\phi_{py}\doteq 2p\lambda_l x_{py(r_0)}/\lambda_r r_0.\qquad(6)$$

由于该倾斜角 $\phi_{py(r_0)}$ 的出现，使一部分信号光波被球透镜的输入孔径所限，而且也使信号频谱在方位向的位置发生了偏离.

我们仍可用上述原理来解决这一偏离问题[3,5]. 如图2所示，方位反射镜原与光轴是 45° 角，现使它与光轴呈 $45°+\alpha_a/2$ 角，则入射到数据片上的光线就产生了 α_a 的倾斜角，这相当于用 $\exp[-j2\pi\sin\alpha_a(x_f/\lambda)]$ 乘以 (3) 式的信号函数. 如果所选的 α_a 角恰好等于 $\phi_{py(r_{0av})}$，对于 $r_0=r_{0av}$ 来说，一级信号光波将平行于透镜的光轴传播. 这时使透镜的有效孔径得到了最佳运用，并使变换平面处的频谱中心定位在 $f_x=0$ 处. 这一近轴校正对于SAR数据片的精确光学成像来说也是很必要的，否则用通常的光学处理系统是难于得到好图像的[5]. 但加了倾斜角 α_a 之后，将使数据片的方位焦点在方位向产生 Δx_1 的偏移：

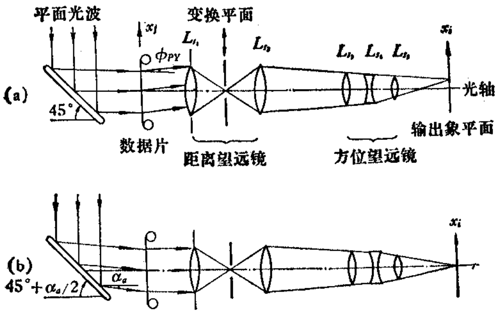


图2　一级光波的偏离及其校正的光学系统

(a) 校正前　(b) 校正后

Fig. 2 The deviation of first order optical signal wave and the optical system for correction

(a) before correction　(b) after correction

$$\Delta x_1=\lambda_r r_0\alpha_a/2p^2\lambda_l. \tag{7}$$

于是通过图2所示的光学系统后，输出图像在输出平面中方位向的位置就变为：

$$x_i=\frac{M_a}{p}x_0+\frac{M_a}{p}x_{pya}\left[1-\frac{r_0}{r_{0av}}\right], \tag{8}$$

式中 M_a——光学系统方位向的放大率 ($M_a<1$). 由 (8) 式可以清楚地看到，这是一个所期望的像点位置加上了一个小的偏移距离. 仅在 $r_0=r_{0av}$ 处像点偏移为零，其余处却不为零. 且偏移距离与斜距 r_0 有关，随 r_0 的变化而变化. 利用在下节实例中给出的数据，由计算可知，像点位置在方位向的畸变性偏离还是不小的. 虽然在 $r_0=r_{0av}$ 处其偏离为零，但在 $r_0=r_{\max}$ 和 $r_0=r_{\min}$ 两端之间，它们在方位向产生的异向位移达14个分辨单元. 也就是说它们对 $r_0=r_{0av}$ 处分别产生了负7个分辨单元和正7个分辨单元的像点位移. 由于该像点位置随 r_0 的变化，致使输出图像畸变失真，分辨力下降. 但我们从 (8) 式的偏移关系，可以找到解决这个问题的办法. 即只要在 $(x_i, r_i)=(0, r_{0av}/q)$ 处，使输出图像记录平面围绕垂直于输出像平面的轴转动一个 ψ_a 角，即可满意地消除这一失真. 由 (7)、(8) 式可求得：

$$\psi_a=qM_a\lambda_r\alpha_a/2p^2\lambda_l. \tag{9}$$

以上是零级方位频谱 $G_1(f_x, f_r)$ 对多普勒频移误差实行光学补偿的情况. 然而在SAR的光学成像处理中，通常使用的是正一级信号光波. 对于一级波来说，(4) 式的频谱表达式 $G_1(f_x, f_r)$ 应为 $G_1(f_x-f_{xp}, f_r)$，其方位频谱的有关部分为：

$$G_1(f_x-f_{xp})=c_1h\left[\frac{f_x+f_{xpy}+f_{xp}}{-2p\beta/\lambda_r}\right]e^{j\frac{\pi q r_0(f_x-f_{xp})^2}{p^2(f_r+2q/\lambda_r)}}\cdot e^{-j2\pi(f_x-f_{xp})\frac{x_0}{p}}, \tag{10}$$

式中 $f_{xp}=f_p/v_f$——空间重复频率；v_f——记录胶片记录时的速度；f_p——发射脉冲重复

频率．位相函数的空间频率有 f_{xp} 的移动，反映在数据片上则相应地加上了一个倾斜角 $\phi_p = \lambda_l f_{xp}$．所以对通常在 SAR 中所用的正一级信号光波来说，这时的 α_a 角应为 α_{a1}：

$$\alpha_{a1} = \phi_{py(r_{0av})} + \phi_p. \tag{11}$$

用零级频谱类似的方法可以证明，对于一级信号光波来说，为消除输出图像畸变失真、改善像质，应加的补偿角 ψ_a，仍如 (9) 式所示．

四、光学补偿的计算、实验结果和误差分析

对一个已获得的 SAR 数据片进行光学成像处理时，为了消除多普勒频移误差对成像的影响，计算其光学补偿有两种方法：(1) 当已知机载 SAR 的有关参数(其中包括在方位向加于信号的固定偏置频率、天线俯仰角、偏航角等)及光学系统的一些参数时，可以由我们上节分析中列出的一些公式来计算 α_{a1} 和 ψ_a 值；(2) 通过对 SAR 数据片的频谱测定(主要测图 3 中所示的 x_2 大小)，并与已知的 SAR 某些参数（此时不要求给出由任何原因产生的多普勒频移误差）及光学系统的一些参数结合起来计算 α_{a1} 和 ψ_a．

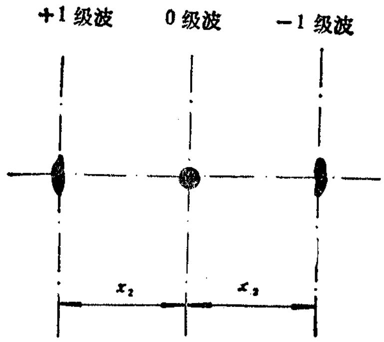


图 3　在频谱面上频谱之间的尺寸

Fig. 3　The distances between spectra on a spectrum plane

作为一个实例，我们用第二种方法计算一个 SAR 数据片的光学补偿参数．首先测量该数据片的谱面尺寸 x_2，由此可以算出含有多普勒频移误差（此时也包括加于信号的离轴偏置频率*)的数据片在方位向的最大空间频率分量 f_x：

$$f_x = x_2 / f_{s1} \lambda_l. \tag{12}$$

该数据片若无多普勒频移误差，则在方位向的最大理论多普勒频率应为：

$$f_{\mathrm{dop}} = \frac{2 v_a \sin \dfrac{\beta}{2}}{\lambda_R}, \tag{13}$$

式中 β——已知的天线波束角．因此，在方位向附加的空间频率偏移 f_{ad} 为：

$$f_{ad} = f_x - f_{\mathrm{dop}} / v_f. \tag{14}$$

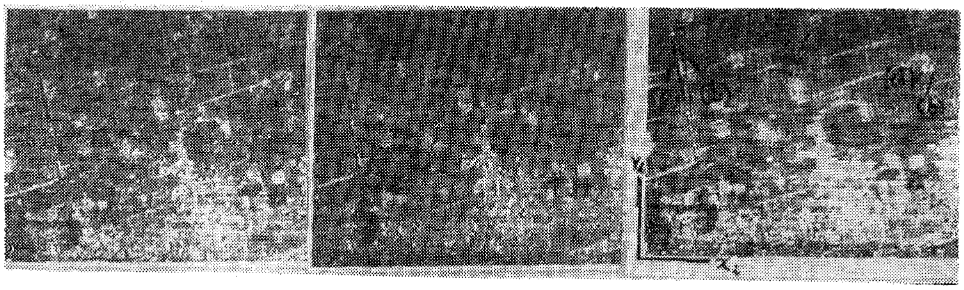
与 (14) 式相应的一级信号光波与光轴所成的衍射角的附加偏移 ϕ_{as} 为：

$$\phi_{as} = \sin^{-1}(\lambda_l f_{ad}) \doteq \lambda_l f_{ad}. \tag{15}$$

该 ϕ_{as} 即为所要求的补偿角 α_{a1}．如果测得 $x_2 = 9\mathrm{mm}$，又已知 $\lambda_l = 0.6328 \times 10^{-3}\mathrm{mm}$，$\beta = 1.25°$，$q = 1.5 \times 10^5$，$p = 10^4$，$v_a = 125\mathrm{m/s}$，$M_a = 1/15$，$f_{s1} = 600\mathrm{mm}$，$f_p = 1000\mathrm{Hz}$，$v_f = 12.5\mathrm{mm/s}$，则可算得该 SAR 数据片的光学补偿角 $\alpha_{a1} = 0.6°$，$\psi_a = -5.7°$．

在图 4(a) 中示出了加补偿角 α_{a1} 及 ψ_a 后的 SAR 图像；图 4(b) 中示出了相同条件下

* 为了分离一级波和零级波，在方位向加离轴偏置频率是必要的，但不能太大，大了对像质有影响．



(a) (b) (c)

图 4 经光学处理后的 SAR 图像

(a) 对多普勒频移误差加光学补偿

(b)没有加光学补偿

(c) 图 4(a) 和图 4(b) 的重叠像

Fig. 4 The image of SAR obtained by optical processing of a data film

(a) with optical compensation for Doppler shift error

(b) without optical compensation

(c) register image of Fig. 4(a) and Fig. 4(b)

未加补偿时的图像．对两者进行仔细比较后可以看出，对多普勒频移误差加光学补偿后，雷达图像的畸变失真得到了校正，分辨力有所提高，像质明显改善．为了能更直观地看清图像几何畸变的校正情况，在图 4(c) 中示出了在同一坐标系 (x_i, r_i) 中图 4(a) 和图 4(b) 重叠放置的叠加像．由图 4(c) 可见，图 4(b) 中呈直线状的目标像相对于图 4(a) 中的同一目标像已有了一个转动角度． 图 4(b) 中那些 $r_0 \neq r_{0av}$ 处的点状目标像也有了同样的转动角度，因而图 4(b) 中和图 4(a) 中的同一点状目标像之间分离了． 它们之间在 x_i 向的移动距离当多普勒频移误差一定时与 $(1 - r_0/r_{0av})$ 成比例关系，r_0 大的移动距离大，r_0 小的移动距离小． 这样对于一个有一定长度和宽度的目标像来说，自然就要畸变失真了．

现对该补偿方法的误差作一分析．首先，关于测量谱面尺寸 x_2 的精度问题． 这是一个如何正确测定一阶信号光波的多普勒频谱中心的问题．在方位向的频谱分布是按脉冲重复频率 (PRF) 重复地出现的．当 PRF 接近多普勒带宽 Δf_d 时，信号频谱的峰值与重复频谱之间的分隔就会变得模糊不清，影响多普勒频谱中心的精确确定．另外，当噪声谱强度增加时，会降低信噪比，所以也会产生同样的影响．然而在一般情况下，信号频谱的中心是清晰的，所以 x_2 的测量误差就不会太大．例如，当 x_2 的测量误差小于 10% 时，可利用上述公式 (12)—(15) 及在实例中给出的一些数据，通过计算可知，只会产生小于 10% 的多普勒频移误差，而补偿角 ψ_a 的误差将小于 4%．因此，对补偿精度的影响是很小的．

此外，我们讨论一下驱动器的稳定度对补偿精度的影响． 当光学处理系统以同步跟踪方式工作时，其输入数据片的传动速度与输出图像记录片的传动速度之比须满足如下要求：

$$v_i/v_r = A_0, \tag{16}$$

式中 v_i 是图像记录片的驱动速度，v_r 是数据片的驱动速度，A_0 是光学系统的放大率（通常 $A_0 < 1$)． 记录数据时与记录输出图像时，对胶片驱动稳定度的要求与对一般全息记录和重建时的要求相似．即成像时对驱动稳定度的要求低于记录数据时的．

现在我们首先讨论 v_i/v_r 的比值有一常数误差 ε 时的情况． 令此时实际数据片传动速度为 v'_r，实际图像记录片的传动速度为 v'_i，则有

$$v'_i/v'_r = A_0 + \varepsilon. \tag{17}$$

该常数误差 ε 的影响，不但使输出图像的方位缩尺因子从 A_0/p 变为 $(A_0+\varepsilon)/p$，而且更为严重的是使所要记录的图像与记录它的胶片之间产生了切向移动，从而使图像模糊．当实际的图像光点以速度 v'_rA_0 移动时，而记录图像的胶片却以 $v'_i = v'_rA_0 + v'_r\varepsilon$ 的速度在移动，因此，当通过宽为 w_x 的输出隙缝之后，在图像记录片上实际记录的图像与正确的图像光点之间的切向位移将是：

$$s_x = w_x v'_r \varepsilon / v'_i; \tag{18}$$

或可写成：

$$\varepsilon / A_0 = s_x / w_x. \tag{19}$$

这就是同步跟踪速度的误差表示式．当希望切向位移小于 1/4 方位分辨单元时，则 (19) 式可写成：

$$\frac{\varepsilon}{A_0} < \frac{A_0}{4p} \cdot \frac{\rho_{Ra}}{w_x} \tag{20}$$

式中 ρ_{Ra} 为方位分辨力．当 $\rho_{Ra} = 15\text{m}$，$A_0 = 1/15$，$w_x = 1\text{mm}$ 时，同步跟踪的速度误差应小于 2.5%．这一速度的同步跟踪要求是不高的，实际装置是能够达到的．当然随着方位分辨力的提高，这个要求也会相应提高．

此外，胶片传送时，随时间变化的速度误差主要是由抖动造成的．低频抖动会产生定位误差；高频抖动则会使图像模糊．因此对高频抖动的限制比低频抖动要严格些．此时令 v_0 是恒定速度，Δv 是由抖动造成的峰值速度误差，抖动频率为 f，则胶片的传送速度为：

$$v(f) = v_0 + \Delta v(f)\cos 2\pi f t. \tag{21}$$

因此胶片的位移为：

$$d = \int v(f)\,dt. \tag{22}$$

最大位移误差为：

$$\Delta d = \int_{-\frac{1}{4f}}^{+\frac{1}{4f}} \Delta v(f)\cos(2\pi f t)\,dt = \frac{\Delta v(f)}{\pi f}. \tag{23}$$

在数据胶片传送中，要求 Δd 值小于 1/4 分辨单元，此时对抖动的要求则为：

$$\frac{\Delta v_r}{v_r} \leqslant \frac{\pi f \rho_{Ra}}{4 p v_r}. \tag{24}$$

相类似，图像记录胶片传送时对抖动的要求为：

$$\frac{\Delta v_i}{v_i} \leqslant \frac{\pi f \rho_{Ra} A_0}{4 p v_i}. \tag{25}$$

例如，当 $v_i = 2.135\text{mm/s}$，$\rho_{Ra} = 15\text{m}$ 时，如果 $f = 0.5\text{Hz}$，则图像胶片的抖动应小于 1.84%；如果 $f = 5\text{Hz}$，抖动应小于 18.4%．这些要求在实际胶片传动系统中都是能够满足的．从以上的误差分析可知，x_2 的实际测量精度，以及两个胶片传送系统的精度都不会

影响我们这一补偿方法的精度要求，只会产生一些容许范围内的误差．此外还有一些影响我们这一补偿方法精度的因素，由于它们与一般全息系统的分析类似，这里不再赘述．

五、小　结

在前面几节中，我们讨论了SAR中多普勒频移误差对成像的影响；给出了在光学成像处理时为消除此影响进行的光学补尝的计算公式和实验方法、实例计算和实验结果，并对这一补偿方法作了误差分析．通过上述的理论分析和实验结果，得出如下几点结论：

(1) 在 SRA 中，由于各种原因引起的多普勒频移误差对成像的影响是严重的，对此进行补偿是必要的；(2) 为了分离一级波和零级波，在方位向适当加离轴偏置频率是必要的，但不宜太大，否则对成像质量有不可忽略的影响；(3) 对于有恒定多普勒频移误差的SAR数据片，在光学处理时，按上述理论计算和实验方法进行光学补偿，其效果是显著的；(4) 恒定多普勒频移误差发生在飞机运动的低频扰动函数是一个时间的线性函数时，或者发生在信号在方位向加有固定的偏置频率或位相差时，或者发生在所用的电子补偿技术在方位向有恒定的残留误差时．在这些情况下，对多普勒频移误差的补偿，用光学方法显然比电子学补偿方法简便、经济，且精度也是足够的；(5) 对于非恒定多普勒频移误差的光学补偿，须解决补偿角 ψ_a 跟踪多普勒频移误差的变化问题．若把光学方法与电子学方法结合起来是可以解决这个问题的． 但这是一个以电子学方法为主的另一个复杂问题，本文不赘述．

本项工作得到陈宗骘同志的关心和支持．在实验工作中，还得到了宋家骏、袁慧坤、王武萍等同志的支持．谢寿生、朱庆澜等同志对本项工作曾提过一些有益的意见，在此一并表示感谢．

参　考　文　献

[1] L. J. Porcello, et al., *Principles of Imaging Radar, University of Michigan*, 1970, Chapter12.
[2] N. Brousseavi, Applied Optics, **18**(1979), 15.
[3] E. B. Felstead, AD-AO71358.
[4] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill*, 1968, p. 10.
[5] A. Kozma, E. N. Leith and N. G. Massey, Applied Optics, **11**(1972), 8.

OPTICAL COMPENSATION FOR DOPPLER SHIFT ERROR IN SYNTHETIC APERTURE RADAR

Mao Yin-fang

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

In this paper the effects of Doppler shift error on the imaging of synthetic aperture radar are analysed. The calculating formulae, the experimental methods, the experimetal results, and the error analysis of optical compensation to eliminate the effects are given.