

傅立叶变换光谱仪信号调制度下降的分析

吴航行, 王模昌

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:从理论上分析了一些引起傅立叶变换光谱仪信号调制度下降的原因,具体的就平面镜面形、偏振态、探测器横向位置偏移、平面镜倾斜、角锥反射镜顶点之间的横向偏移等作了一定的分析,得到了几个重要的公式,并就这些公式的用途作了简短的说明。

关键词:红外空间遥感;傅立叶变换光谱仪;调制度;探测器;平面镜倾斜;角锥反射镜

中图分类号:TH744.4 **文献标识码:**A

ANALYSIS ON THE DECREASE OF SIGNAL MODULATION IN FOURIER TRANSFORM SPECTROMETER

WU Hang-Xing, WANG Mo-Chang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract:The causes of decreasing the modulation of the signal of Fourier transform spectrometer were analyzed from theoretical point of view. Specifically the decrease caused by the plane mirror, polarization effects, detector's lateral shift from the optical axis of the system, plane mirror's tilt and the vertex shift of one corner cube reflector relative to the other was analyzed, and some formulas were deduced and their usages were simply commented.

Key words:infrared space remote sensing; fourier transform spectrometer; modulation; detector; mirror tilt; corner cube reflector

引言

光谱仪作为一种光谱分辨仪器,是现代工农业生产、国防、科学研究等不可缺少的工具.根据工作原理的不同,可分为:棱镜光谱仪、光栅光谱仪、傅立叶变换光谱仪等.傅立叶变换光谱仪的一个优点是多通道同时测量,另一个优点是高通量,对于微弱目标信号也能响应,仪器的信噪比相当高.因此它已经成为现代红外光谱仪的代表和主要发展方向,尤其是在中、远红外光谱区,在高精度、高光谱分辨率、高灵敏度的应用中,傅立叶变换光谱仪几乎是唯一的选择.对于航空航天红外空间遥感应用来说,傅立叶变换光谱技术是获得大容量高精度大气温度、湿度、水汽高度分布、地表成分以及地面气压等信息的一种重要手段.相对于传统的滤光片光谱仪和光栅光谱仪,傅立叶变换光谱仪的优点突出,目前已经发射的或将要发射的航天遥感用傅立叶变换光谱仪的通

道数可高达到数千,而光谱分辨率又远高于滤光片式光谱仪的分辨率.这些特性提高了温度和湿度的反演精度,为数值气象预报提供了条件.它在气象遥感上的应用已经成为一种必然的发展趋势.

为了跟踪国际先进技术和发展自己的航天遥感事业,我国也在研究傅立叶变换光谱技术,力争在以后的气象卫星上能够使用这种仪器,本文就是在这样的背景下进行的研究.

1 调制度的定义

傅立叶变换光谱仪从本质上来说是一种干涉仪,所以可用干涉仪的理论来分析.对于两平面波干涉,产生的信号强度可表示为^[1]:

$$I(x, \sigma) = I_a + I_b + 2\sqrt{I_a I_b} \cos(2\pi\sigma \cdot x) = I_0(1 + \gamma_0 \cos(2\pi\sigma \cdot x)) = I_0 + I_{ac} \quad (1)$$

其中 I_0 是理想情况下的入射光强度,一般可设为 1

(因为我们只关心相对强度), I_a 和 I_b 是 I_0 经过分光板以后所形成的两支干涉光路的光辐射强度, x 表示两支光路之间的光程差, σ 表示干涉光的波数, I_{ac} 表示干涉信号与光程差 x 有关的分量, 若用机械扫描改变光程差并用探测器把光信号转换成电信号, 那么它将是信号的有效成分——交流分量.

干涉信号的调制度(或称可见度) M 被定义为^[1,2]:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别是干涉信号 $I(x, \sigma)$ 的极大值和极小值. 于是有 $M = \gamma_0$, 若两支干涉光路的光辐射强度相同, 即 $I_a = I_b$, 则有信号调制度 $M = \gamma_0 = 1$.

2 引起信号调制度下降的原因

考虑实际情况以后, 干涉仪信号调制度将下降. 究其原因, 大体上可分为如下 4 类: 1) 平面镜面形的影响; 2) 光在入射过程中的偏振态受到反射、分光等影响而改变, 从而使得信号调制度下降; 3) 光学元件的位置偏离理论设计值, 如元件的倾斜、振动或安装误差等; 4) 干涉仪有限视场角大小的影响.

3 理论分析

3.1 平面镜面形的影响

实际使用的平面镜、角锥反射镜或红外透镜等光学元件, 都不是理想的, 存在一定的面形误差, 用这样的元件组成的干涉光路, 必然导致信号调制度的下降. 以平面镜为例, 设它的面形为 $f(\eta, \zeta)$, 在有效区域内的平均值为零, 则平面波经过它的反射, 波面将成为 $2f(\eta, \zeta) \cos(\alpha)$, 其中 α 为平面波的入射角. 同时, 设干涉仪中其它光学元件都是理想的, 则有干涉信号:

$$I = \frac{1}{S_{\text{exp}}} \iint |1 + \cos[2\pi\sigma(\bar{x} + 2f(\eta, \zeta) \cos(\alpha))]|^2 d\eta d\zeta \quad (3)$$

其中, S_{exp} 为平面镜的有效区域面积. 另一方面 $\iint f(\eta, \zeta) d\eta d\zeta = 0$, 当 $4\pi\sigma \cos(\alpha) f(\eta, \zeta) \ll 1$ 时, 可先把被积函数用三角函数关系展开, 再对变化部分用级数展开, 只取到前面的二阶小量, 则有:

$$I \approx 1 + \left[1 - \frac{1}{2}(4\pi\sigma \cos(\alpha))^2 \frac{1}{S_{\text{exp}}} \iint (f(\eta, \zeta))^2 d\eta d\zeta \right] \cos[2\pi\sigma \bar{x}] = 1 + M \cos(2\pi\sigma \bar{x}) \quad (4)$$

所以有调制度:

$$M = 1 - \frac{1}{2}(4\pi\sigma \cos(\alpha))^2 \langle (f(\eta, \zeta))^2 \rangle > \quad (5)$$

这说明信号调制度的下降与平面镜面形的标准偏差的平方成正比, 与波数的平方成正比, 与入射角的余弦的平方成正比, 也就是说, 对于光线斜入射到平面镜的情况, 可以适当降低对平面镜的面形要求.

3.2 入射光偏振态的影响

光束以一定的角度入射到分束器上, 经过分光板和反射, 从干涉仪出来的光的 p、s 偏振分量的信号调制度是不同的. 下面用一个简单的模型来说明, 如图 1 所示, 分束器由分光板和起补偿作用的介质板组成, 它们都是理想的平行平板, 材料和厚度相同, 分光板 1 面镀 50%/50% 的分光介质膜, 另一面 4 和介质板的两个面都不镀膜(或镀相同的增透膜), 两支光束按原来的光路返回到分束器上.

用 r_i 表示分束器第 i 个面从空气(或真空)到介质面的反射系数, 用 t_i 表示透射系数. 用带一撇的相应符号表示光沿着相反方向传播时的量, E_0 表示入射光的复振幅, 则经过光路 1 返回来的光的复振幅为: $E_1 = t_3 t_2' r_1 t_3' r_{m1} t_3 t_2' t_1 t_4' E_0 e^{i2\pi\sigma \cdot \text{opl}_1}$ (6a) 而经过光路 2 返回来的光的复振幅为:

$$E_2 = t_3 t_2' t_1 t_4' r_{m2} t_4 r_1' t_4' E_0 e^{i2\pi\sigma \cdot \text{opl}_2} \quad (6b)$$

其中, r_{m1} 表示光路 1 中的反射镜的反射系数, r_{m2} 表示光路 2 中的反射镜的反射系数, opl_1 和 opl_2 表示光分别在两条支路中所走过的光程. 因 2、3、4 面相同, 都不镀膜(或镀相同的增透膜), 由膜层分析理论可知:

$$r_1 = -r_1', \quad t_2 = t_3 = t_4, \quad t_4' = t_2' = t_3' \quad (7)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_1}{r_1'} \frac{r_{m1}}{r_{m2}} t_3' t_3 e^{i2\pi\sigma \cdot (\text{opl}_1 - \text{opl}_2)} = -\frac{r_{m1}}{r_{m2}} t_3 t_3' e^{i2\pi\sigma \cdot x}$$

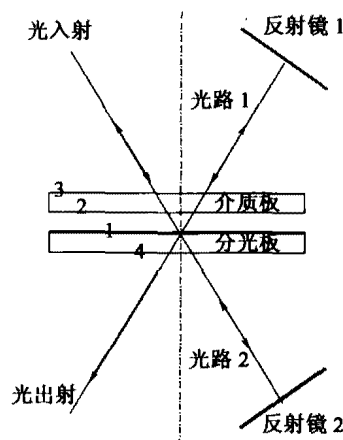


图 1 简单的干涉仪模型
Fig. 1 A simple interferometer model

$$= - \left| \frac{r_{m1} t_3 t_3'}{r_{m2}} \right| e^{i(2\pi\sigma \cdot x + \phi)} \quad (8)$$

因此,干涉信号可以表示为: $I = |E_2|^2 \left| \frac{E_1}{E_2} + 1 \right|^2 = C[1 - M\cos(2\pi\sigma \cdot x + \psi)]$

其中干涉信号的调制度: $M = \frac{2 \left| \frac{r_{m1} t_3 t_3'}{r_{m2}} \right|}{1 + \left| \frac{r_{m1} t_3 t_3'}{r_{m2}} \right|} \quad (9)$

图为 r_{m1} 、 r_{m2} 、 t_3 和 t_3' 都是与光的偏振态有关的量,不同的偏振态有不同的值,从而干涉信号的调制度随偏振态不同而变化。

3.3 光学元件的倾斜或者位置变化的影响

下面就探测器中心横向偏离系统光轴、平面反射镜倾斜、角锥反射镜顶点的横向偏移等作初步的

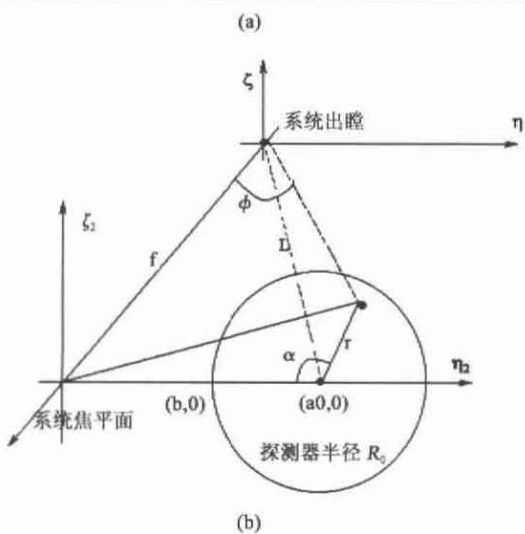
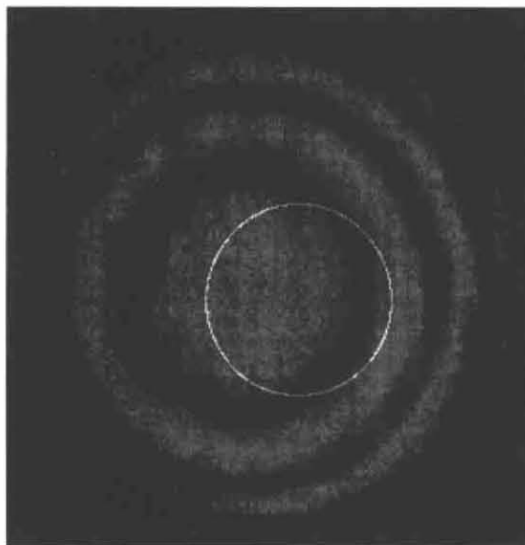


图2 探测器形状和在系统焦平面上的位置(a)探测器的形状和位置(b)坐标系统
Fig. 2 The shape of the detector and its position on the system focal plane (a) detector's shape and position (b) the coordinate system used to deduce the formulas

分析。

3.3.1 探测器中心横向偏离光轴

设探测器形状为圆形,如图2(a)中圆的白线所示,干涉条纹为“牛眼”状,当探测器中心与光轴中心不一致时,信号的调制度将下降。现在从理论上来计算因此而引起的调制度下降量,坐标系统及有关参数如图2(b)所示。从图中可见(小视场条件下),

$$\cos(\phi) = \left(1 + \frac{a_0^2 + r^2 + 2a_0 r \cos(\alpha)}{f^2} \right)^{-1/2} \approx 1 + \frac{a_0^2 + r^2 + 2a_0 r \cos(\alpha)}{2f^2} \quad (10)$$

在探测器上的干涉信号交流分量为:

$$I_w = \frac{1}{\pi R_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \cos(2\pi\sigma x \cos(\phi)) r dr d\alpha \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \cos\left\{ \frac{\pi\sigma x}{f^2} [(2f^2 - a_0^2) - (R_0^2 \rho^2 + 2a_0 R_0 \rho \cos(\alpha))] \right\} \rho d\rho d\alpha$$

令 $E = \frac{\pi\sigma x}{f^2}$, $A = 2\pi\sigma x(1 - \frac{a_0^2}{2f^2})$, $u = 2ER_0^2$, $v = 2Ea_0R_0$, 则 A 与积分变量无关,有

$$I_w = \cos A \left[2 \int_0^1 \cos\left(\frac{1}{2}u\rho^2\right) \cdot J_0(v\rho) \rho d\rho \right] + \sin A \left[2 \int_0^1 \sin\left(\frac{1}{2}u\rho^2\right) \cdot J_0(v\rho) \rho d\rho \right] = C(u, v) \cdot \cos A + S(u, v) \cdot \sin A = M \cos\left(A - \frac{1}{2}u + \Theta\right) \quad (11)$$

当 $\frac{R_0}{a_0} < 1$ 时, $M = \frac{2}{u} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$, $\text{tg}(\Theta) = \frac{U_2}{U_1} \quad (12a)$

当 $\frac{R_0}{a_0} > 1$ 时,

$$M = \frac{2}{u} \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + 1 - 2V_1 \sin\left(\frac{v^2 + u^2}{2u}\right) - 2V_0 \cos\left(\frac{v^2 + u^2}{2u}\right)} \text{tg}(\Theta) = \frac{\cos\left(\frac{u^2 + v^2}{2u}\right) - V_0}{\sin\left(\frac{u^2 + v^2}{2u}\right) - V_1} \quad (12b)$$

上面的两个积分 $C(u, v)$ 和 $S(u, v)$ 用 Lommel 函数 $U_n(u, v)$, $V_n(u, v)$ 表达^[3], U_n 、 V_n 分别是

$$U_n = \sum_0^\infty (-1)^s \left(\frac{u}{v}\right)^{n+2s} J_{n+2s}(v), \quad V_n = \sum_0^\infty (-1)^s \left(\frac{v}{u}\right)^{n+2s} J_{n+2s}(v), \quad (13)$$

由此可见, M 就是干涉信号的调制函数,而探测器离开光轴位置还会引入附加相位。

3.3.2 平面镜的倾斜

设一片平面反射镜倾斜一小角度 β , 则两干涉平面波之间将产生夹角 2β , 在探测器上的干涉信号会因此而减小, 现在来推导信号调制度的下降与倾斜角 β 之间的关系, 坐标系及参数如图 3 所示. 由于通过干涉仪观察目标的角度很小, 对所有视场立体角 $\Omega = \pi\theta^2$ 积分 (Ω_{\max} 是最大视场立体角), 可得

$$I_{ac} = \frac{1}{\Omega_{\max}} \int_0^{\Omega_{\max}} \cos[2\pi\sigma x - \sigma x \Omega] d\Omega \quad (14)$$

现在由于波面倾斜, 使得光程差 x 与波面上的位置有关. 设系统出瞳口径大小为 D (不失一般性, 设波面倾斜旋转轴垂直于纸面), 为了简化计算和说明问题, 对出瞳仅作一维积分.

$$I_{ac} = \frac{1}{D\Omega_{\max}} \int_0^D dy \int_0^{\Omega_{\max}} \cos[2\pi\sigma x - \sigma x \Omega] d\Omega \quad (15)$$

其中, $x = \bar{x} + y \cdot \tan(\beta) \approx \bar{x} + 2y \cdot \beta$ (对于小角度 β 作一级近似), 令 $A_1 = 2\pi\sigma\bar{x}(1 - \frac{\Omega}{2\pi})$, 与 y 无关, $B_1 = 4\pi\sigma D\beta$, 与 Ω 无关 (因 β 与 Ω 都是小量), 从而有:

$$I_{ac} = \frac{1}{\Omega_{\max}} \left\{ \int_0^1 \cos B_1 \rho d\rho \int_0^{\Omega_{\max}} \cos A_1 d\Omega - \int_0^1 \sin B_1 \rho d\rho \int_0^{\Omega_{\max}} \sin A_1 d\Omega \right\}$$

经过整理可得:

$$I_{ac} = \text{sinc}\left(\frac{\sigma\bar{x}\Omega_{\max}}{2\pi}\right) \text{sinc}(2\sigma D\beta) \cos\left(2\pi\sigma\bar{x}\left(1 - \frac{\Omega_{\max}}{4\pi}\right) - 2\pi\sigma D\beta\right) \quad (16)$$

这说明波面倾斜使信号调制度下降和引入附加相位.

3.3.3 角锥反射镜顶点横向偏移的影响

设角锥反射镜是理想的, 如图 4 所示, 横向偏移量大小为 r , 沿光轴的光程差用 \bar{x} 表示, 则角锥反射镜横移后光程差 x 为: $x = \bar{x} \cos(\theta) - 2r \sin(\theta) \cos(\varphi)$, 其中 $\varphi = 0$ 所指的方向就是横向偏移的方向. 因此, 干涉信号的交流分量为:

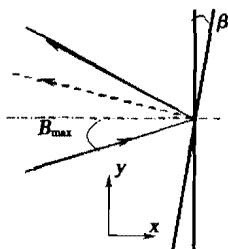


图 3 平面镜的倾斜
Fig. 3 Plane mirror tilt

$$I_{ac} = \frac{1}{\pi\theta_{\max}} \int_0^{\theta_{\max}} \int_0^{2\pi} \cos[2\pi\sigma(\bar{x}) \cos(\theta) - 2r \sin(\theta) \cos(\varphi)] \sin(\theta) d\varphi d\theta \quad (17)$$

利用三角函数的和差化积公式和积分函数的奇对称性, 并利用等式 $\int_0^\pi \cos[x \cos(\varphi)] d\varphi = \pi \cdot J_0(x)$, 再令 $\sin(\theta) = t \cdot \sin(\theta_{\max})$, 因 θ_{\max} 比较小, 近似有

$$\cos(\theta) \approx 1 - \frac{1}{2}(t \cdot \sin(\theta_{\max}))^2$$

再把 $u_1 = 2\pi\sigma\bar{x} \sin^2(\theta_{\max})$, $v_1 = 4\pi\sigma r \sin(\theta_{\max})$, $A_1 = 2\pi\sigma\bar{x}$ 代入上面的式子, 可以得到:

$$I_{ac} = C(u_1, v_1) \cos(A_1) + S(u_1, v_1) \sin(A_1) \quad (18)$$

$$\text{其中, } C(u_1, v_1) = 2 \int_0^1 \cos\left(\frac{1}{2}u_1 \cdot t^2\right) \cdot J_0(v_1 t) dt$$

$$S(u_1, v_1) = 2 \int_0^1 \sin\left(\frac{1}{2}u_1 \cdot t^2\right) \cdot J_0(v_1 t) dt$$

与前面公式 (11) 相比, 情况完全类同, 所以结果也完全类似——信号调制度的下降和引入一个相位, 这里就不再赘述.

4 讨论

一般地, 红外分光是由镀在基板上的介质膜来实现的, 对于光的偏振态的影响, 从公式 (9) 可见, 分光介质膜对调制度的影响主要是通过 u' 完成的, 而两支光路的不一致, 通过 r_{m1}/r_{m2} 影响调制度. 因此只要光路对称, 有 $r_{m1}/r_{m2} = 1$, 则信号调制度的下降将只由红外分光板引起. 大家知道, 光通过一分介面, 它的偏振特性要发生变化, 减小入射角度的大小, 可以减小这一影响, 因此, 大部分光谱仪光束在分光板上的人射角都比较小, 取 30° 左右, 且尽可能使干涉仪中的两支光路对称, 以减小偏振态的影响.

对于平面镜的倾斜, 当角度 β 趋向于零时, 公式 (16) 将退化为:

$$I_{ac} = \text{sinc}\left(\frac{\sigma\bar{x}}{2} \cdot \frac{\Omega_{\max}}{\pi}\right) \cos\left[2\pi\sigma\bar{x}\left(1 - \frac{\Omega_{\max}}{4\pi}\right)\right] \quad (19)$$

(下接第 344 页)

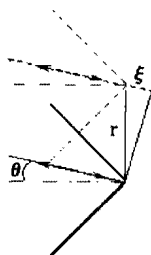


图 4 角锥反射镜顶点的横向偏移
Fig. 4 Lateral shift of the vertex of one corner cube reflector

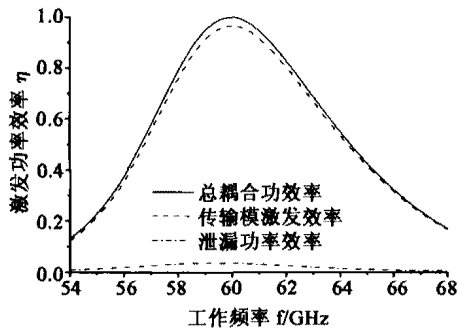


图6 半无限长导波结构的激励参数

Fig.6 Excitation parameters of half - infinite waveguide coupling structure

位置对激发效率的影响。

比较图3和图5在无限长导波结构中,当缝隙长度为1.95mm时耦合最强,而在半无限长导波结构中,当缝隙长度由此减少或增加时,各存在着一个激励效率的峰值.在两个峰值附近能量几乎都能达到全耦合,但第一个峰值处的缝隙较小,所引起的NRD波导泄漏能量少,传输模的激发效率最强,为96.4%,其余能量包括极微弱的源波导反射能量和NRD波导侧向辐射能量.相应的尺寸为 $L = 1.89\text{mm}$, $L_t = 1.41\text{mm}$, $L_s = 3.41\text{mm}$,图6是此结构尺寸下NRD波导激发效率曲线.可见传输模的3dB带宽约7.5GHz,提供了丰富的有用带宽资源.

4 结语

在平面/非平面混合微波集成电路中采用缝隙激励NRD波导中的 LSE_{01} 基模是一个简单而有效的途径,数值试验证明可达96.4%的激励效率.此种激励方式具有结构简单,体积小,效率高,泄漏少等优点,对提高多层集成电路的集成度有重要的实际意义.文中给出的计算曲线对于混合集成电路中NRD波导激励方式的设计有很好的参考价值.

REFERENCES

- [1] Abdallah Bacha, Ke Wu. LSE - mode balun for hybrid integration of NRD-guide and microstrip line [J], *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998, 8(5): 199—201.
- [2] Alberto Sanchez, Arthur A Oliner. A new leaky waveguide for millimeter waves using nonradiative dielectric (NRD) waveguide-part I: accurate theory [J], *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1987, 35(9): 737—747.
- [3] Roger F Harrington. *Time-Harmonic Electromagnetic Fields* [M], New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1961.
- [4] Sembiam R Rengarajan. Characteristics of a longitudinal/transverse coupling slot in crossed rectangular waveguides [J], *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1989, 37(9): 1171—1177.
- [5] Luk K M, Zeng X Y, Xu S J. Spectral domain Green's function of magnetic type for NRD guides and H-guides [J], *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(10): 1975—1981.

(上接第340页)同样,当探测器的横向偏移量 a_0 趋向于零时,公式(12b)也将退化为式(19) ($\Omega_{\max} = \pi \frac{R_0^2}{f^2}$),而当角锥反射镜的顶点横向偏移量 r 趋向于零时也一样 ($\Omega_{\max} = \pi \sin^2(\theta_{\max})$).从公式(19)可见,傅立叶变换光谱仪在仅考虑有限视场角影响情况下,信号调制度的下降与视场立体角大小成SINC函数关系.

前面所推导出的公式的意义在于为设计傅立叶变换光谱仪、光学机械元件的大小和质量指标的提出,提供了理论依据.例如,按公式(16),就波面倾斜而言,若要保证所有频谱信号调制度下降不低于80%,要求有 $2\sigma_{\max} \text{dB} \leq 0.36$,也就是说在最小波长为 $8\mu\text{m}$ 、系统口径大小为4cm时,需要倾斜量 β 小于7.4角秒.

对于红外实际应用,探测器的横向偏移的最大允许值,在设计时可由分配给的调制度允许下降值,用计算机数值计算方法来估计得到.例如,通常有最

大波数 $\sigma_{\max} \cong 2500\text{cm}^{-1}$,最大光程差 x 约2cm,若探测器口径大小以0.1mm而系统出瞳到焦平面距离以15cm计算,要求最大波数的干涉信号在光程差为1.325cm时的调制度不低于0.85,则按公式(11)探测器的偏移量不得超过约1.1倍的探测器半径,也就是说,要小于 $55\mu\text{m}$.

5 结语

本文论述傅立叶变换光谱仪干涉信号调制度的概念,研究并推导了一些影响调制度下降的原因和公式,就这些公式的实用意义作了初步分析和讨论.

REFERENCES

- [1] HARIHARAN P. *Optical Interferometry* [M], Centrecourt, North Ryde: Academic Press Australia, 1985: 10—13.
- [2] VANASSE GEORGE A. *Spectrometric Techniques Vol. 2* [M], New York: Academic press Inc, 1981: 70—71.
- [3] BORN M, WOLF E. *Principle of Optics, Fourth Edition* [M], Oxford: Pergamon Press Ltd, 1970: 436—439.