

光谱波段可编程多光谱扫描仪探讨

王建宇 薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海)

摘要——本文在分析多光谱遥感的原理和特点的基础上提出了多光谱扫描仪光谱波段可编程系统, 讨论了该系统的优越性和信噪比变化情况, 最后给出了实现这种系统的两种方案。

关键词——多光谱扫描仪, 波段可编程。

1. 引 言

本文根据多光谱遥感的特点, 通过对地物信号的分析, 提出在进行不同目的的遥感时, 选择不同的波段组合, 达到最佳波段工作, 从而在同样的光谱波段数下获取更多的信息量。一般来说, 对于不同的地物目标, 不同的时间, 不同的地点有各自不同的最佳波段。

光谱波段可编程的多光谱扫描仪就是能够根据需要自由选择波段组合方式的多光谱扫描仪。它是一种比较理想的遥感仪器。本文详细地分析了系统原理及参数, 并提出几种实施的方案。

2. 系 统 分 析

2.1 光谱波段可编程的原理和设计思想

将一个地面目标近似地看成一个朗伯漫射体, 如果在波长为 λ 处的反射率为 $\rho(\lambda)$, 这样, 在波长 λ 附近单位波长间隔内的辐射强度 N_λ 可表示为

$$N_\lambda^2 = \frac{E_\lambda^2 \rho(\lambda) \cos \Theta}{\pi}; \quad (1)$$

式(1)中, E_λ 是在 λ 附近单位波长间隔内太阳落在这个目标上的辐照度, Θ 是太阳照射方向与地面法线方向的夹角。

对于接收仪器来说, 如第 k 个波段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)内其光谱灵敏度为 $S_k(\lambda)$, 则第 k 通道的输出信号为:

$$x_k = A_k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_k(\lambda) \frac{E_\lambda \rho(\lambda) \cos \Theta}{\pi} d\lambda \quad (2)$$

式(2)中 A_k 是由仪器通道决定的通道常数.

遥感的目的是希望得到反射率 $\rho(\lambda)$ 的值, 但通过表达式(2)仍无法解出 $\rho(\lambda)$, 为此作如下讨论:

根据式(1)有:

$$\rho(\lambda) = \frac{N_k \sigma}{E_\lambda \cos \Theta} \quad (3)$$

而 N_k 和 E_k 对通道响应 $S(\lambda)$ 的率均值为:

$$\bar{N}_k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda \rho(\lambda) S_k(\lambda) \cos \Theta d\lambda}{\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_k(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

$$\bar{E}_k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda S_k(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

把 \bar{N}_k 和 \bar{E}_k 代替式(3)中的 N_k 和 E_k 得 ρ_k :

$$\rho_k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda \rho(\lambda) S_k(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda S_k(\lambda) d\lambda}$$

通过式(6)可以看到 ρ_k 其实就是 $\rho(\lambda)$ 在波长 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 内带权 $E_\lambda S_k(\lambda)$ 的平均值. 对照式(6)和式(2)可以得到

$$x_k = \frac{A_k \cos \Theta}{\pi} \rho_k \bar{E}_k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_k(\lambda) d\lambda; \quad (7)$$

式(7)中, $\frac{A_k}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_k(\lambda) d\lambda$ 仍是由仪器通道决定的常数. 令其为 B_k , 则有:

$$x_k = B_k \bar{E}_k \rho_k \cos \Theta; \quad (8)$$

$$\rho_k = \frac{x_k}{B_k \bar{E}_k \cos \Theta}. \quad (9)$$

通过以上分析可知, 由输出信号 x_k 得到的是波长在 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 内 $\rho(\lambda)$ 带权 $E_\lambda S_k(\lambda)$ 的平均. 一般来说, 窗口 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 取得越窄, 得到的 ρ_k 就越接近于实际值 $\rho(\lambda)$, 当窗口取得无限小时, 则 ρ_k 就与 $\rho(\lambda)$ 相等. 对于 N 个波段的多光谱扫描仪, 得到的数据可作如下分析:

把地物目标的反射率 $\rho(\lambda)$ 写成(10)的形式

$$\rho(\lambda) = c_1 \phi_1(\lambda) + c_2 \phi_2(\lambda) + \dots + c_N \phi_N(\lambda); \quad (10)$$

这里用一组“基本函数” $\{\phi_k(\lambda)\}$ ($k=1, 2, \dots, N$) 来分解 $\rho(\lambda)$, 这样, 当 $\{\phi_k(\lambda)\}$ 选定之后, 就可以用它的系数集 $\{c_k\}$ 来表示 $\rho(\lambda)$. 从理论上说, 要使式(10)成立, $\{\phi_k(\lambda)\}$ 必须是一个完备的函数系, 表示一个任意函数的“基本函数”系的 k 一般是趋于无穷大的, 对于多光谱遥感来说, 如果把 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的平均反射率 ρ_k 看成是第 k 个“基本函数”的系数, 那么每个通道就相当于一个“基本函数”, 在数学上可用一“窗口函数”表示:

$$\phi_k(\lambda) = u(\lambda - \lambda_{k-1}) - u(\lambda - \lambda_k); \quad (11)$$

式(11)中, $u(\lambda)$ 为阶跃函数, 这样就可以用多光谱遥感得到的 ρ_k 来近似地表示 $\rho(\lambda)$

$$\rho(\lambda) \doteq \rho_1\phi_1(\lambda) + \rho_2\phi_2(\lambda) + \dots + \rho_N\phi_N(\lambda). \quad (12)$$

等式两边的方均误差 $\bar{\varepsilon}^2$ 为:

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{1}{\lambda_N - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_N} \left[\rho(\lambda) - \sum_{k=1}^N \rho_k \phi_k(\lambda) \right]^2 d\lambda. \quad (13)$$

很明显, 波长“窗口函数”取得越窄, 也就是波段数越多, $\left[\rho(\lambda) - \sum_{k=1}^N \rho_k \phi_k(\lambda) \right]^2$ 的值就越小, 则 $\bar{\varepsilon}^2$ 也就越小; 当波段数 N 趋于无限大时, $\bar{\varepsilon}^2$ 就趋向于零。

进一步分析式(13)可知, 当波段数 N 不变时, 那么 $\bar{\varepsilon}^2$ 就是 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N-1}$ 等 $(N-1)$ 个变量的多元函数; 也就是说, $\bar{\varepsilon}^2$ 的大小与波段的分割方式有关。令 $\bar{\varepsilon}^2$ 对 λ_k 的偏导为零

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}^2}{\partial \lambda_k} = 0, \quad (14)$$

这样就得到一组由 $(N-1)$ 个方程组成的方程组, 解此方程(14)就能使 $\bar{\varepsilon}^2$ 为最小。通过这种方式得到的波段分割方式就是最佳波段组合了。一般 λ_k 的值与 $\rho(\lambda)$ 的函数形式有关。也就是说, 在波段数目 N 不变的情况下, 根据地物信号的特征, 尽可能提高 N 个波段的完备性, 使它们更接近完备的函数系, 这样既能增加信息量, 又不增加数据率。Siegrist 和 Schnetyler^[3] 等人讨论过岩石判别的最佳波段, 提出最佳波段包括 $1.18 \sim 1.30 \mu\text{m}$, $4.50 \sim 4.75 \mu\text{m}$, $0.46 \sim 0.50 \mu\text{m}$, $1.52 \sim 1.73 \mu\text{m}$, $2.10 \sim 2.36 \mu\text{m}$ 等。如果采用这组最佳波段, 其正确分类率要比 4 个 MSS 波段高 20%; 比 6 个 TM 波段高 14%。Tucker^[4] 在 1978 年分析了各种波段组合对植被监视的优先次序, 并指出复杂的植被需要特殊的光谱波段子集来区分。文献[5]通过对我国云南腾冲地区光谱反射率的分析, 指出在可见光区 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) 区分植被较为理想的波段为 $0.51 \sim 0.58 \mu\text{m}$, $0.61 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 和 $0.73 \sim 0.85 \mu\text{m}$, 并指出在不同的时间、地点、季节其最佳波段是不一样的。

光谱波段可编程的多光谱扫描仪的基本设计思想是采用元数较多的探测器列阵或面阵, 先预分成较多的波段数。使用时根据需要, 在微处理器的控制下, 对数据进行实时的预处理, 挑选或组合成几个较少的所需波段的输出。由于微处理器的引入, 这种编程方式将具有很大的任意性和实时性。

根据上述设想, 对几组以岩石为主的地物光谱进行了模拟计算, 原始数据为 64 个波段,

表 1 不同波段组合方式的比较

Table 1 Comparison for different manners of band combination.

组别 (样本数)	波段范围 (μm)	平均 ρ	原始 $\sqrt{\sigma_0^2}$	等 间 隔 组 合			经 选 择 后 组 合		
				$\bar{\varepsilon}_1^2$	$\sqrt{\bar{\varepsilon}_1^2/\rho}$ (%)	$\sqrt{\sigma^2}$	$\sqrt{\bar{\varepsilon}_3^2}$	$\sqrt{\bar{\varepsilon}_3^2/\rho}$ (%)	$\sqrt{\sigma^2}$
第一组 (41)	0.4~1.1	25.3	14.377	5.50	9.2	14.184	2.88	6.7	14.276
第二组 (38)	0.4~1.1	22.8	9.949	0.96	4.3	9.900	0.70	3.6	9.914
第三组 (38)	1.9~2.5	35.5	9.808	2.55	4.5	9.677	1.42	3.3	9.735
第四组 (49)	1.9~2.5	62.2	13.541	0.422	1.0	13.525	0.347	9.5	13.528

把它们等间隔或有选择地组合成 8 个波段,其结果如表 1 所示. 由表 1 可见,有选择的组合方式引入的误差 \bar{s}^2 小,而数据的方差 σ^2 大,这表明有选择的波段组合能够减小误差,增加信息量.

2.2 光谱波段可编程系统信噪比的分析

根据文献[6],在可见和近红外波段内使用硅光二极管探测器时,各波段的信噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{\omega \tau_a \tau_o A \xi D_\lambda^2 E \rho}{\pi \sqrt{2e(I_s^2 + I_b^2)} \Delta f + 4KT \Delta f / R^2 f^2} \quad (15)$$

式(15)中, ω 为瞬时视场立体角, τ_a 为大气透过率; τ_o 为光学效率; A 为有效通光面积; ξ 为太阳能量对波长的分布; D_λ 为探测器的响应率.

对于红外波段,温差为 ΔT 的两个相邻目标,系统能探测到的信噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{D_o \tau_a \tau_o \sqrt{\omega} D^* X_T^2 \Delta T}{4F \sqrt{\Delta f}} \quad (16)$$

式(16)中, D_o 为有效通光面积的直径; D^* 为探测器的探测率; X_T 为目标的微分辐射发射量; F 为光学系统的 F 数.

如果有 N 个波段的信号相迭加,其信噪比可以根据统计规律求得:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_N = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{v}_{si}^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N c_{ij} \sqrt{\bar{v}_{si}^2} \cdot \sqrt{\bar{v}_{sj}^2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{v}_{ni}^2}}; \quad (17)$$

式(17)中, c_{ij} 定义为

$$c_{ij} = \frac{\bar{v}_{si} \cdot \bar{v}_{sj}}{\sqrt{\bar{v}_{si}^2 \cdot \bar{v}_{sj}^2}} \quad (18)$$

式(17)中,假定噪声与信号不相关,各波段之间的噪声也不相关,如果对于相邻通道近似地认为

$$\begin{cases} \bar{v}_{si}^2 = \bar{v}_{sj}^2 = \bar{v}_s^2; \\ \bar{v}_{ni}^2 = \bar{v}_{nj}^2 = \bar{v}_n^2; \end{cases} \quad (19)$$

这样就有

$$\left(\frac{S}{N}\right)_N = \sqrt{N} \sqrt{1 + \frac{1}{N} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N c_{ij}} \quad (20)$$

当 $c_{ij}=1$ 时,信噪比提高 \sqrt{N} 倍,即

$$\left(\frac{S}{N}\right)_N = \sqrt{N} \left(\frac{S}{N}\right)_1, \quad (21)$$

当 $c_{ij}=0$ 时,信噪比没有提高,即

$$\left(\frac{S}{N}\right)_N = \left(\frac{S}{N}\right)_1. \quad (22)$$

实际上,相邻波段的信号相关是比较大的, c_{ij} 在 0.9 以上. 这里对红外细分扫描仪 6 个波段的部分试验数据进行了统计,得到 6 个波段之间的 c_{ij} 值(见表 2),这些值都接近 1. 红外细分扫描仪的 6 个波段的中心波长分别为 2.043、2.087、2.143、2.200、2.280 和 2.380

μm , 其带宽为 $0.1\mu\text{m}$.

表 2 各波段之间的 c_{ij}
Table 2 c_{ij} between different bands

c_{ij}	c_{h_1}	c_{h_2}	c_{h_3}	c_{h_4}	c_{h_5}
c_{h_2}	0.998				
c_{h_3}	0.995	0.999			
c_{h_4}	0.996	0.998	0.998		
c_{h_5}	0.995	0.996	0.993	0.998	
c_{h_6}	0.995	0.994	0.991	0.997	0.999

3. 系统的实现

实现光谱波段可编程的多光谱扫描系统的方案很多, 本文给出了两种方案.

3.1 模拟迭加方案

模拟迭加方案的框图如图 1 所示. 几个探测器得到 n 个预分波段, n 路前置放大器的输出信号经过编程开关网络, 通过模拟加法器有机地组合成较少的 m 个波段输出, 开关逻辑由 CPU 控制, 试验前或试验中要改变波段组合方式, 只要向微机系统送入合适的编程码, 波段即可改变. 组合后的 m 路信号经过放大和必要的处理, 最后可由模拟磁带机记录, 也可经 A/D 转换后再记录. 这种方案虽然设计思想简单, 但是, 并行处理系统的结构比较庞大, 特别 n 数目很大时, 就变得难以实现.

3.2 数字迭加方案

数字迭加方案是把从 n 路前置放大器出来的并行模拟信号先转换成串行模拟信号(或者象 OCD 器件那样, 输出本身就是串行信号), 通过主放, A/D 转换变成串行数字信号, 再用数字电路对 n 个波段的数据进行分离、组合. 此方案中, 整个系统只要一个通道, 其框图

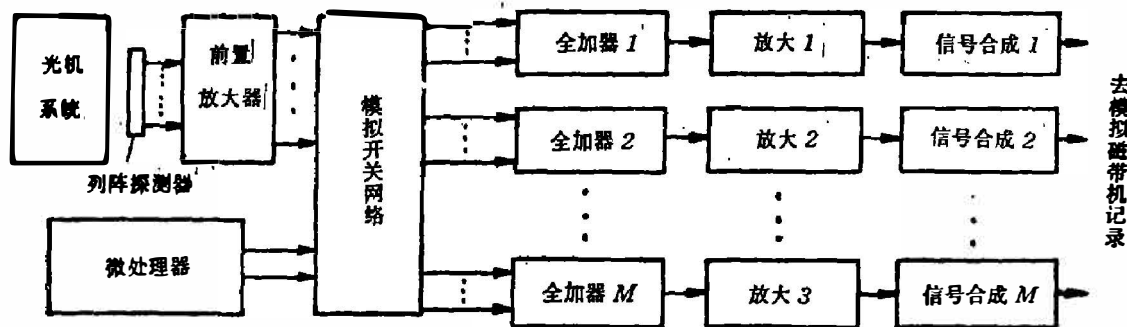


图 1 模拟迭加系统框图

Fig. 1 Block diagram of analogy superposition system.

见图 2. 从前放得到的 n 路并行模拟信号, 先经过并串转换电路, 把信号变为串行的模拟信号, 再经过由程控放大器组成的主放电路放大; 程控放大器的增益由 CPU 根据输入信号的大小自动设定. 放大后的信号经 A/D 转换电路变成串行的数字信号, 再经过光谱响应校正、直流分量恢复等必要的处理后, 数据进入编程组合电路进行波段, 组合由于 n 个通道串联起来后数据率较高, 一般处理一个数据的时间在微秒的量级, 所以这部分全部用硬件完

成, 电路框图如图 3 所示. 电路在编程的时序控制下实现了波段的有机组合, 并对迭加后的信号作归一化处理, 以保证最后输出的各波段数据有相同的位数. 整个系统在微处理器协调下工作, 波段编程和数据处理都是实时的.

根据数字迭加方案, 在 DGS 多光谱扫描仪的基础上进行了原理性样机的制作, 样机的主要指标为:

工作波段: 由可见与近红外波段予分的 16 个基本波段组合成 2~8 个波段并行输出; 总视场: 90°; 瞬时视场: 3 mrad; 扫描率: 10~30 1/s; $NE\Delta\rho$: 约 0.5%.

提高遥感仪器的光谱分辨率以探测地物光谱的精细结构是遥感仪器的发展方向, 采用光谱波段可编程的方案, 既可以不丢失或少丢失感兴趣部分的地物光谱信号, 又可以减少整

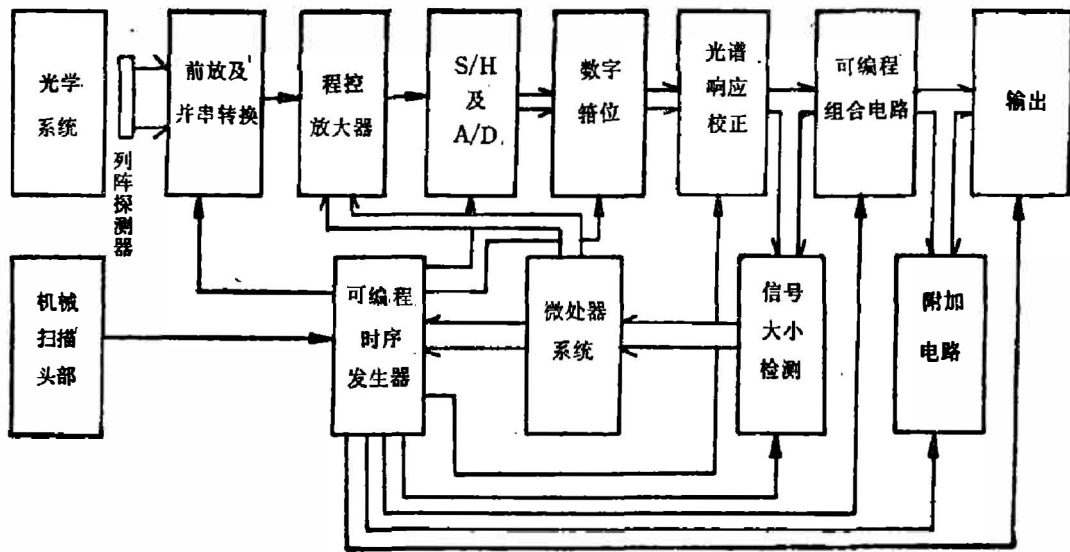


图 2 数字迭加系统框图

Fig. 2 Block diagram of digital superposition system.

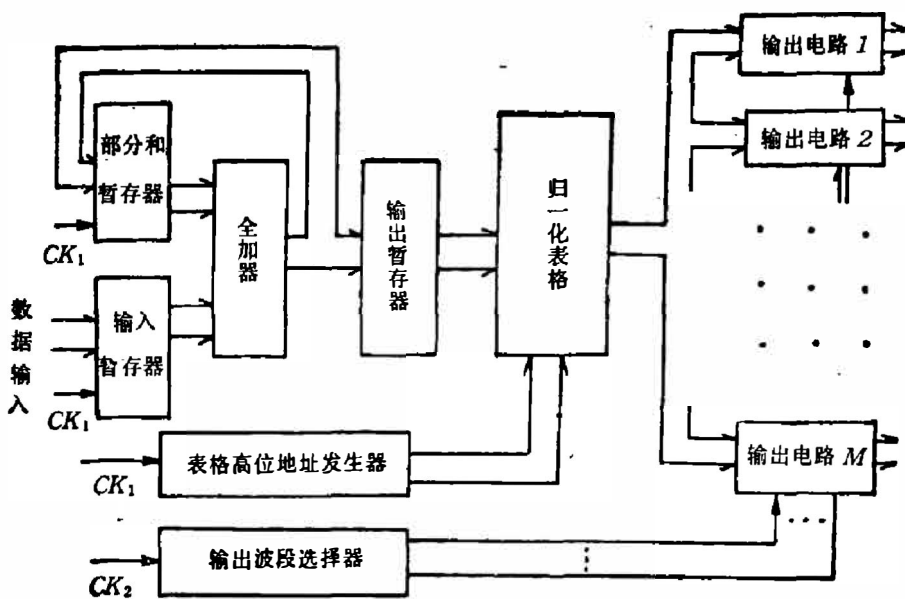


图 3 可编程波段组合电路

Fig. 3 Programmable circuit of band combination

个系统输出的数据率,还能方便地得到某些特定的光谱波段组合(如 TM、MSS 等),同时这种方法也可以用于成象光谱仪数据的机上实时预处理,以减少成象光谱仪输出的数据率。所以本课题的研究对遥感仪器的发展是很有意义的。

参 考 文 献

- [1] Vane G. et al., *Preceeding of the 1984 Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium.*
- [2] John B. Wellen, et al., *Proceeding of the 1983 Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium.*
- [3] Siegrist A. W. and Schnetyly C. C., *Photogr. Eng. Remote Sensing* **46**(1980); 1207.
- [4] Tucker C. J., *Photogr. Eng. Remote Sensing*, **44**(1978), 1369.
- [5] 马荣斌、卓宝熙, *遥感原理和工程地质判释(上册)*, 北京: 中国铁道出版社, 1982, p241.
- [6] 张幼文, *红外光学工程*, 上海: 上海科技出版社, 1982, p424.

DISCUSSION ABOUT MULTISPECTRAL SCANNER WITH PROGRAMMABLE SPECTRAL BANDS

WANG JIANYU XUE YONGQI

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, China)

ABSTRACT

A multispectral scanner system with programmable spectral bands is presented based on the analyses of the principle and features of multispectral remote sensing. The advantage and the signal-to-noise ratio of the system are discussed. Two projects to implement the system are given.