

文章编号: 1001 - 9014(2008)03 - 0197 - 05

基于半分析模型的新庙泡叶绿素 a 浓度反演研究

徐京萍^{1,2}, 张 柏¹, 宋开山¹, 王宗明¹, 刘殿伟¹, 段洪涛^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 叶绿素 a (Chl-a) 含量是反映水体水质的重要参数之一, 利用遥感技术监测其浓度具有众多优势. 本研究利用 2004 年 5~9 月的吉林省新庙泡实测高光谱数据和实验室分析数据, 建立了基于三波段的 Chl-a 浓度反演模型. 该模型基于水体叶绿素 a、悬浮物、溶解有机物、纯水的生物光学特性分析, 优化组合了 3 个特征波长. 结果表明用该方法建立的模型具有一定的物理基础, 反演精度较高, 其决定系数和均方根误差分别为 0.8758、4.98 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 适合于内陆水体 Chl-a 含量的定量提取.

关键词: 高光谱遥感; 半分析模型; 叶绿素 a; 新庙泡

中图分类号: X87 **文献标识码:** A

ESTIMATION OF CHLOROPHYLL-a CONCENTRATION IN LAKE XINMIAO BASED ON A SEMI-ANALYTICAL MODEL

XU Jing-Ping^{1,2}, ZHANG Bai¹, SONG Kai-Shan¹, WANG Zong-Ming¹,
LIU Dian-Wei¹, DUAN Hong-Tao^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2 Graduate School of CAS, Beijing 100039, China;)

Abstract: Remote sensing has many advantages to assess Chlorophyll-a (Chl-a) concentrations. By *in situ* spectral and matching Chl-a contents measurement from May to September of 2004 in lake Xinmiao, Jilin province, a three-band model was erected to optimize band combination for accurate Chl-a estimation. The model was based on the optical properties of Chl-a, suspended sediments, chromatic dissolved organic carbon and pure water. Strong linear relationship was established between analytically measured Chl-a concentrations and estimated values. The results show that the model has physical foundation and high precision with high determination coefficient 0.8758 and low root-mean-square error 4.98 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The model has been proved to be a useful tool to assess Chl-a levels in inland waters.

Key words: hyperspectral remote sensing; semi-analytical model; chlorophyll-a; Lake Xinmiao

引言

叶绿素是藻类重要的组成成分之一, 其浓度高低是表征光能自养生物量的重要指标, 可用于估测浮游植物的生物量和生产力, 也是反映水体营养化程度的一个重要参数, 因此通过测定叶绿素 a (Chl-a) 含量在一定程度上能够反映水体水质状况^[1]. 目前, 利用遥感技术监测水体, 可快速获得大面积较为准确的叶绿素信息, 特别是高光谱技术在国内外已有很多成功应用^[2]. 利用遥感技术监测水质参数通常有 3 种方法, 即经验方法、半分析方法和分析方

法. 经验方法由于缺乏物理依据, 水质参数与遥感数据之间的事实相关性不能保证. 而分析方法以水体光学传输机理为理论基础, 虽然是水质遥感监测的一种重要方法, 但其物理机理较复杂, 建立算法的难度较大, 因此很难真正实际应用. 近年来, 基于水体生物光学模型的半分析方法越来越受到重视, 该方法通过分析水体组分与固有光学量、固有光学量与表观光学量之间的关系来反演水质参数, 模型精度较高, 并且具有一定的可行性和较强的应用价值.

Giteison 等人^[3]曾基于植被、土壤等物质的光学传输机理提出了三波段式的半分析模型用于估测植

收稿日期: 2007 - 07 - 20, 修回日期: 2008 - 01 - 25

Received date: 2007 - 07 - 20, revised date: 2008 - 01 - 25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-356), 国家自然科学基金 (40401003, 40371082), 中国科学院资源环境领域野外台站基金, 中国科学院“东北之春”人才培养计划和中国科学院东北振兴科技行动计划重大项目资助

作者简介: 徐京萍 (1982-), 女, 湖北十堰人, 中科院东北地理与农业生态研究所读博士, 主要从事地理信息系统应用和水质高光谱遥感研究.

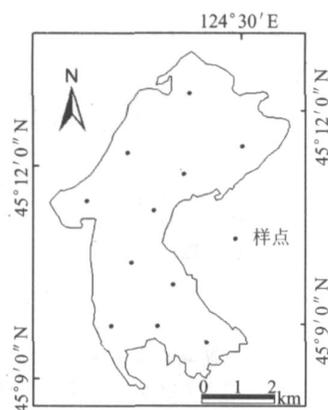


图 1 采样点位置分布图

Fig 1 Location of sample points

被叶绿素含量, Zimba^[4]、Dall'Ormo^[5]等人将该方法应用于水体叶绿素 a 反演,大大提高了反演精度。因此,本文基于实测高光谱数据,尝试结合 Gordon 水体生物光学模型,通过分析叶绿素 a、悬浮物、溶解有机物、纯水在某些特征波长的吸收、散射特性,建立新庙泡水体叶绿素 a 浓度的反演模型,并对该模型进行精度评价。

1 数据获取

本文以位于松嫩平原湖泊群中的新庙泡做为研究对象。2004年5月~2004年9月每月1次对新庙泡代表点位进行水体的遥感反射率测量计算,同步测量水体透明度和采集水样,并用GPS对采样点进行定位,实验样点分布见图1。光谱测量时间在10:00~14:00,天空基本晴朗无云,水面平静。所用仪器为美国ASD公司生产的FieldSpec FSR VNIR野外光谱仪,可在350~1050nm波长范围内进行连续测量,采样间隔为1.4nm,光谱分辨率3nm,视场角25°。仪器操作严格按照说明书进行。为了减少水体镜面反射的影响以及船舶阴影对光场的破坏,采用具有一定观测角度进行测量:观测方位角为135°左右(设太阳入射的方位角为0°),观测天顶角为40°左右^[6]。水体透明度的测量采用塞克盘法,其范围在0.3~0.7m之间。Chl-浓度的测定是利用分光光度计法在室内实验分析得到。本次研究共计28个采样点,其中随机选取20个采样点数据用来建模,剩下8个采样点数据用以模型验证。对于所有样点,Chl-浓度最高值在7月(44.48μg·L⁻¹),最低值在5月(0.35μg·L⁻¹),均值为15.46μg·L⁻¹。

2 水体光谱特征

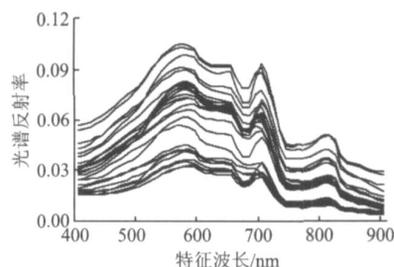


图 2 新庙泡水体采样点的光谱曲线

Fig 2 Spectral reflectance curves in Lake Ximiao

光谱测量结果如图2所示,光谱曲线呈现出典型的内陆水体光谱特征。由于叶绿素、类胡萝卜素以及溶解有机物质的吸收,使得400~500nm处的水体反射率较低;510~620nm间的反射峰是由于藻类色素的低吸收,无机悬浮物和浮游植物细胞壁的散射,特殊物质如类胡萝卜素浓度增加所引起的;在680nm附近出现Chl-吸收峰;而680~710nm间的反射峰是浮游植物色素的荧光效应所造成的,可用于指示Chl-含量的高低^[7]。

3 建模原理

水体的遥感反射率 R_{rs} 定义为离水辐亮度与水面入射总辐照度的比值。根据Gordon模型^[8]推算,其值可由描述水体的固有光学特性参数来反映:

$$R_{rs} = \frac{f}{Q} \frac{b_b(\lambda)}{[I(\lambda) + b_b(\lambda)]}, \quad (1)$$

其中 f 为受太阳高度角和水体散射影响的参数; Q 为光场分布参数,受不同水体、太阳角度、观测角度影响而不同。Morel和Gentili^[9]指出对同一水体, f 和 Q 在同样的光照条件下具有协同变化的效应,因此对于它们的比值,可以忽略太阳高度角等因素的影响,将其视为定值。 a 为总的吸收系数,水体的吸收主要受纯水、Chl-、悬浮物(TSM)、溶解性有机物质(CDOM)的影响,因此,

$$a = a_w + a_c + a_d + a_g, \quad (2)$$

其中, a_w 、 a_c 、 a_d 、 a_g 分别为纯水、Chl-、TSM、CDOM的吸收系数。 b_b 为总的后向散射系数,由于Chl-和CDOM的后向散射非常弱,可忽略,因此:

$$b_b = b_{b,w} + b_{b,d}, \quad (3)$$

式中, $b_{b,w}$ 、 $b_{b,d}$ 分别为纯水和悬浮物的后向散射系数。

通过光谱分析组合3个波段的反射率分离出 R_{rs} ,使组合结果成正比于Chl-吸收系数,而受水中其他物质的影响较小,其最终形式如下:

$$[R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(\lambda_2)] / R_n(\lambda_3) = c \quad (4)$$

而 c 可由下式表示:

$$a_c(\lambda) = C \times c^*(\lambda) \quad (5)$$

式中 $c^*(\lambda)$ 为波长 λ 处的 Chl- 吸收系数; C 为 Chl- 浓度; $c^*(\lambda)$ 为 Chl- 比吸收系数,随不同季节藻类的不同而发生变化.在某些特征波段,Chl- 浓度反演模型的精度受 $c^*(\lambda)$ 的变化影响较大^[5],可采用波段优化的方法找到 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的最佳位置,使得式(4)与 Chl- 含量的相关性最大,反演精度最高.由于本研究中采样数据的季相跨度较大,因此可以保证最终模型受 $c^*(\lambda)$ 的影响较小.

4 Chl-a 浓度反演模型

4.1 建模与分析

首先以公式(4)为目标,结合研究区的光谱曲线图,大概确定 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的波段范围.下面具体阐述选择原则.在 λ_1 波段处 a_c 较大,而水中其他物质吸收系数相对于 a_c 较小,可选择 Chl- 的吸收峰: 660nm λ_1 690nm^[5];而在 λ_2 处,水中其他物质的吸收系数与在 λ_1 处时相当,而 $a_c(\lambda_2) \ll a_c(\lambda_1)$, λ_2 取值可在 Chl- 荧光峰: 690nm λ_2 710nm.在 λ_1 - λ_2 范围内,CDOM 和非色素悬浮物的吸收系数随波长的指数递减使其值很低,而纯水的吸收系数在该波段范围内的变化也很小,因此两波段的总吸收系数之差近似等于 $a_c(\lambda_1)$.此外,在 650~750nm 波段范围内,总后向散射系数 b_b 主要受悬浮物的影响,其值变化不大,可认为定值^[10].根据以上推理可得公式(6)如下:

$$R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(\lambda_2) = \frac{Q}{f} \frac{a_c(\lambda_1) - a_c(\lambda_2)}{b_b} = \frac{Q}{f} \frac{c(\lambda_1)}{b_b} \quad (6)$$

为了消除 Q 、 f 和 b_b ,引入近红外波段处 λ_3 的反射率 $R_n(\lambda_3)$,在该波段主要是纯水的吸收起主要作用,即 $a_c \gg b_b$,其他物质的吸收系数很小,因此 $R_n(\lambda_3) \approx b_b(\lambda_3) = w(\lambda_3)$,根据图 2,选定 730nm λ_3 800nm. Raymond 等人的研究表明^[11],在该波段内 w 的变化不大,可取定值.因此得式(7):

$$R_n(\lambda_3) = \frac{f}{Q} b_b \quad (7)$$

将式(6)和式(7)相乘,便得到式(4).

为了确定 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的最佳具体位置,采用循环优化的方法(见表 1),使得 $[R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(\lambda_2)] / R_n(\lambda_3)$ 与 Chl-a 浓度的相关性最好.根据图 2,分别

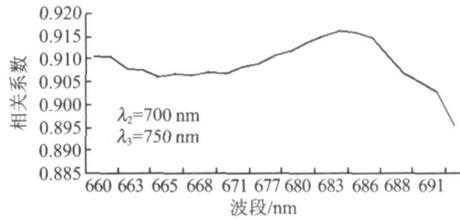


图 3 $[R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(700)] / R_n(750)$ 与 Chl- 浓度相关系数变化图

Fig 3 Correlation between $[R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(700)] / R_n(750)$ and Chl- concentrations against 660 - 690nm spectral bands

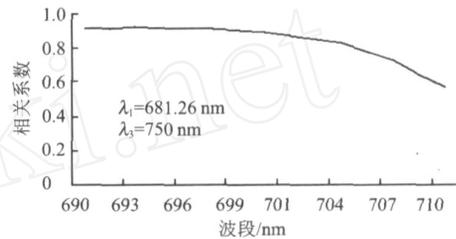


图 4 $[R_n^{-1}(681.26) - R_n^{-1}(\lambda_2)] / R_n(750)$ 与 Chl- 浓度相关系数变化图

Fig 4 Correlation between $[R_n^{-1}(681.26) - R_n^{-1}(\lambda_2)] / R_n(750)$ and Chl-a concentrations against 690 ~ 710nm spectral bands

设置 λ_2 、 λ_3 的初始位置为 700nm、750nm,在 660 ~ 690nm 范围内,计算 $[R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(700)] / R_n(750)$ 与 Chl- 浓度的相关系数(图 3).从图 3 中可以看出, λ_1 在 660~690nm 范围内, $[R_n^{-1}(\lambda_1) - R_n^{-1}(\lambda_2)] / R_n(\lambda_3)$ 与 Chl- 浓度相关系数总体较高,但以 681.26nm 处最好.因此在下一步优化 λ_2 时, λ_1 设置为 681.26nm,而 λ_3 仍为 750nm.在 690 ~ 710nm 范围内, $[R_n^{-1}(681.26) - R_n^{-1}(\lambda_2)] / R_n(750)$ 与 Chl- 浓度相关系数变化见图 4.由图可知,应将 692.77nm 作为下一步优化 λ_3 时 λ_2 的值, λ_1 仍为 681.26nm, λ_3 的取值范围为 730~800nm,其结果见图 5,此时 λ_3 最佳位置 799.18nm,与优化 λ_1 波段时的初始值相差较远,因此设置 λ_2 、 λ_3 分别为 692.77nm、799.18nm 按照上述过程重新优化 λ_1 ,其结果为 689.89nm.当继续优化 λ_2 、 λ_3 时,各最佳波段值已保持不变,因此可最终确定 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的最佳位置分别为 689.89nm、692.77nm 和 799.18nm.以 $[R_n^{-1}(689.89) - R_n^{-1}(692.77)] / R_n(799.18)$ 的值为自变量,建立的 Chl-a 浓度的反演模型如下(图 6):

$$y = 1320.7x + 2.7748 \quad (N = 20, R^2 = 0.8758, p < 0.0001) \quad (8)$$

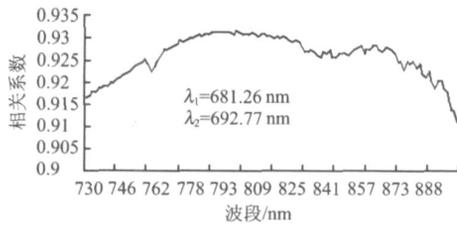


图5 $[R_{rs}^{-1}(681.26) - R_{rs}^{-1}(692.77)]R_{rs}(\lambda_3)$ 与Chl-a浓度相关系数变化图

Fig. 5 Correlation between $[R_{rs}^{-1}(681.26) - R_{rs}^{-1}(692.77)]R_{rs}(\lambda_3)$ and Chl-a concentrations against 730 - 800nm spectral bands

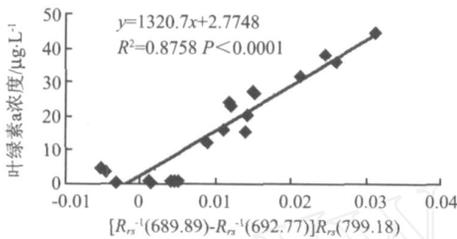


图6 基于三波段的Chl-a浓度反演模型

Fig. 6 Estimating of Chl-a concentrations with three spectral bands

式中, x 为 $[R_{rs}^{-1}(689.89) - R_{rs}^{-1}(692.77)]R_{rs}(799.18)$ 计算值; y 为 Chl- a 的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 模型的均方根误差 (RMSE)为 $4.98\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

经过上述过程确定的三波段最佳位置与 Zimba 等人^[4]的研究结果 (λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 650nm、710nm、740nm)存在差异,其原因可能是由于新庙泡 Chl- a 浓度普遍不高,尤其是 5月份的 Chl- a 含量偏低,平均值还不到 $1\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Zimba 等人^[4]的研究结果表明该模型可适合 $4.4\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} - 217.3\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 较大范围的 Chl- a 浓度,这一点由图 6也可看出,5月份的低浓度 Chl- a 含量散点数据离拟和的直线相对较远.但就方法本身而言,其不失为一种较准确反演内陆水体 Chl- a 浓度的模型,因为内陆水体的特点就是高叶绿素含量和高悬浮物含量.本研究中 5月份的数据偏低是由于藻类浮游植物在此时还没有大量繁殖,但新庙泡本身是内陆水体,并具备上述特征,因此适合用该模型反演其 Chl- a 含量.

4.2 模型验证

将 8个检验样本数据带入公式 (8),其结果见图 7.估测值中出现了两个负值,是由于这两点的实测 Chl- a 含量很低,使得估测结果受系统误差影响较大.经计算,模型的均方根误差为 $7.71\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,小于检验样本极值差 $37.73\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,表明用该模型反演新庙泡 Chl- a 浓度结果较理想.

表 1 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 最佳位置表

Table 1 The optimal position of λ_1 、 λ_2 、 λ_3					
λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	λ_3 (nm)	被优化最佳位置 (nm)	$[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3)$	与 Chl- a 浓度的相关系数
660 - 690	700	750	681.26		0.9165
681.26	690 - 710	750	692.77		0.9246
681.26	692.77	730 - 800	799.18		0.9317
660 - 690	692.77	799.18	689.89		0.9358
689.89	690 - 710	799.18	692.77		0.9358
689.89	692.77	730 - 800	799.18		0.9358

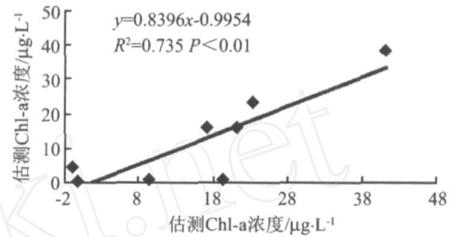


图 7 三波段模型验证

Fig. 7 Test of the three-band model

5 结论

本研究基于 Gordon水体生物光学模型,建立了包含三个波段的 Chl- a 浓度反演模型.该过程的实现是先通过分析 Chl- a 、悬浮物、溶解有机物、纯水在某些特征波长的吸收、散射特性确定三波段的大概位置,再经过循环优化过程找到最佳位置.结果表明当 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 689.89nm、692.77nm 和 799.18nm时,用 $[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3)$ 建立的反演模型效果最佳,决定系数为 0.8758,均方根误差为 $4.98\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.虽然该模型对于低 Chl- a 含量样点反演的精度不够理想,但不失为一种较好的定量提取内陆水体 Chl- a 含量的方法.

由于该算法是在水体组分与固有光学量、固有光学量与表观光学量之间的关系分析基础上推导出来的,因此算法具有一定的物理依据,能较好的解释最终结果.而内陆水体水质遥感趋势之一就是系统深入研究水质组分的内在光学特性,利用高光谱数据和中、低分辨率多光谱数据进行水质组分的定量提取和组分间混合信息的剥离,从而建立不受时间和地域限制的水质参数反演算法,因此本研究可为该目标的实现奠定一定的研究基础.

REFERENCES

- [1] YN Qiu, SHU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, *et al* Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球,

- 疏小舟,徐兆安,等.湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(6): 427—430, 435.
- [2] GONG Cai-Lan, YN Qiu, KUANG Ding-Bo, *et al* Study on the spectral reflectivity models of different water quality parameters in Huangpu River [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (巩彩兰,尹球,匡定波,等.黄浦江不同水质指标的光谱响应模型比较研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 282—286.
- [3] Gitelson A, Gritz U, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves [J]. *J. Plant Physiol*, 2003, **160**, 271—282.
- [4] Zimba P, Gitelson A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization [J]. *Aquaculture*, 2006, **256**: 272—286.
- [5] Dall'Orto G, Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results [J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(3): 412 - 422.
- [6] TANG Jun-Wu, TAN Guo-Liang, WANG Xiao-Yong, *et al* The spectra measurement and analysis about water : method of measurement above water [J]. *Journal of remote sensing* (唐军武,田国良,汪小勇,等.水体光谱测量与分析:水面以上测量法. *遥感学报*), 2004, **8**(1): 37—44.
- [7] DUAN Hong-Tao, ZHANG Bai, LIU Dian-Wei, *et al* Relationship between fluorescence peak spectral features and Chlorophyll-a in Lake Chagan [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (段洪涛,张柏,刘殿伟,等.查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 a响应关系研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 355—359.
- [8] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al* A semianalytic radiance model of ocean color [J]. *J. Geophys Res*, 1988, **93**: 10909—10924.
- [9] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters III, implications of bidirectionality for the remote sensing problem [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**: 4850—4862.
- [10] Melin F, Zibordi G, Berthon J F. Assessment of SeaWiFS atmospheric and marine products for the Northern Adriatic Sea [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, **41**: 548—558.
- [11] Raymond C S, Karen S B. Optical properties of the clearest natural waters (200 - 800nm) [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 177—184.

(上接 192页)

速范围是 $[-585.9\text{m/s}, 585.9\text{m/s}]$ 时,速度分辨率是 1.14m/s 可见,复合测速法可以更加有效地提高测速精度和测速范围.利用 PD 法测速的精度高,及 SF 测速的速度范围大,得到一种既有大的测速范围又有高的测速精度的复合测速方法.在信号频率不变的情况下,测速精度和时间成反比,测速范围和信号帧周期成反比,延长测速时间和帧周期,可以提高测速精度和范围,因此在工程应用中可以根据实际需要来设计系统参数.

3 结语

针对毫米波雷达,提出一种 SF 和 PD 复合测速的方法对毫米波运动目标一维距离像进行运动补偿,并通过仿真实验证明了这种方法的可行性、快速性.利用该方法进行运动补偿所得的目标一维距离像,可以应用于毫米波雷达中,进行精确的目标识别,测距等处理.

REFERENCES

- [1] LIU Jing, LI Xing-Guo, LI Yue-Hua Motion compensation for 1-D range profile of moving target in MMW costas frequency hopped radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘静,李兴国,李跃华.毫米波 Costas 编码雷达运动目标一维距离像运动补偿. *红外毫米波学报*), 2005, **24**(5): 346—347.
- [2] LONG Teng Doppler performance analysis of frequency stepped radar signal [J]. *Modern Radar* (龙腾.频率步进雷达信号的多普勒性能分析. *现代雷达*), 1996, **2**: 31—37.
- [3] SHI Zhi-Guang, FU Qiang A velocity compensation method of moving target's high resolution range profile [J]. *Guidance & Fuze* (石志广,付强.一种运动目标距离象的速度补偿方法. *制导与引信*), 2002, **23**(3): 14—17.
- [4] LIU Zheng, ZHANG Shou-Hong Estimation of target motion parameter in a stepped frequency pulses radar [J]. *Acta electronica sinica* (刘峥,张守宏.步进频率雷达目标的运动参数估计. *电子学报*), 2003, **28**(3): 43—45.
- [5] CHEN Hang-Yong, LIU Yong-Xiang, LI Xiang, *et al* Analysis of Micro-Doppler and parameters estimation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈行勇,刘永祥,黎湘,等.微多普勒分析和参数估计. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 360—363.
- [6] WU Hong-Gang, LI Xiao-Feng, CHEN Yue-Bin, *et al* Spatial-Temporal adaptive clutter classification suppression and dim small moving targets detection [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴宏刚,李晓峰,陈跃斌,等.空时自适应杂波分类抑制与弱小运动目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 301—305.