

# 岷江上游典型流域林冠截持降雨遥感模型与反演

李玉霞<sup>1</sup>, 杨武年<sup>2</sup>, 童玲<sup>1</sup>, 简季<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 610054; 2. 成都理工大学国土资源信息技术与应用国土资源部重点实验室 成都 610059)

**【摘要】**在对岷江上游典型流域研究区实地踏勘和定位观测的基础上,综合利用ETM和ASTER遥感数据、地面实测数据和常规观测数据等资料,结合森林水量平衡原理,建立了岷江上游典型流域林冠截持降雨遥感信息模型。以遥感图像中单个像元作为测算单位,对模型参数叶面最大持水度、覆盖度、叶面积指数(LAI)进行了计算,并对岷江上游毛儿盖地区林冠截留降雨量进行了反演。并利用研究区实测数据、生态环境本底遥感调查数据和水文气象数据对上述模型反演结果进行验证和精度分析。结果表明,模型反演结果精度较高,能较好反应研究区植被冠层截留量的实际状况。

**关键词** 定量遥感; 降雨截持; 空间分析; 植被指数

中图分类号 S715.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.024

## Remote Sensing Model and Inversion of Canopy Rainfall Interception in the Upstream of Minjiang Valley

LI Yu-xia<sup>1</sup>, YANG Wu-nian<sup>2</sup>, TONG Ling<sup>1</sup>, and JIAN Ji<sup>2</sup>

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Institute of RS&GIS, Chengdu University of Technology Chengdu 610059)

**Abstract** The paper constructs a remote sensing model of the forest canopy rainfall interception in the upstream of Minjiang Valley based on the principle of the forest water content balance and research on the orientation observation. The enhanced thematic mapper (ETM) and various data from remote sensing, practical measurement and routine observation are fully utilized in this model. By taking one pixel of the remote sensing images as the calculating unit, the model parameters, including vegetation coverage, leaf area index (LAI), and leaf rainfall interception are calculated, and the inverse calculation of the interception rainfall quantity of the forest coronal in the Maoergai Region of Minjiang Valley is given and analyzed. The results show that the inversion model can better reflect the true condition of the forest canopy rainfall interception in the research area.

**Key words** quantitative remote sensing; rainfall interception; spatial analysis; vegetation index

植被冠层截留降雨过程十分复杂,它使得林地降雨与空地上的降雨截然不同。植被冠层截留降雨是土壤-植物-大气连续体(SPAC)水循环中一个相当重要的量,是森林生态系统参与水分传输的第一界面层<sup>[1]</sup>。植被冠层截留具有双重的生态学意义,对于水资源丰富或降水异常频繁的地区,植被冠层截留能减少林内雨量,推迟林下降雨和产流时间,并通过转化为树干茎流起到涵养水源的作用<sup>[1-3]</sup>。因此,研究植被冠层的水文作用,对于定量、深入地研究森林水量平衡及生态水层涵养水源的功能,具有一定的现实意义。目前,在国外已有的林冠截留模型中,Rutter模型和Cash解析模型是较为完善和应用广泛的两个林冠截留模型,这两个模型都考虑了附加截留量(降雨过程的冠层蒸发量)。但许多学者认

为,附加截留量不稳定,应该忽略,如BIOME-BGC、MIKE SHE、WaSiM-ETH等模型<sup>[4-6]</sup>。国内对此研究也比较多,但是由于植被冠层截留量难以直接测定,国内外缺乏理想的方法和模型定量计算,以往的模拟多数局限于使用间接方法或经验模型估算。但一些方法对实验条件要求较高,测量精度受人为影响较大,获得信息有限,难以向大尺度上推广和应用。所以,大区域植被冠层截留量的研究仅仅依靠地面观测是行不通的,卫星遥感为大区域研究植被冠层截留量提供了最佳的途径。

本文根据对岷江上游研究区的实地踏勘和定位观测研究,结合ETM和ASTER遥感数据,利用“3S”技术对研究区植被冠层截留量进行初步的空间模拟;利用定量遥感技术建立模型,对植被冠层截留

收稿日期: 2008-10-20; 修回日期: 2009-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(60841006); “十一五”国家科技支撑计划(MYHT0601)

作者简介: 李玉霞(1979-),女,博士,主要从事定量遥感、“3S”技术在生态环境监测与评价、国土资源勘查等方面的研究。

量进行模拟和反演, 其结果能全面反演和揭示生态系统对水文过程的调节作用。考虑到森林植被截留降雨过程的复杂性, 再加实验条件的限制, 本文研究的森林植被冠层截留量已包含了林下植被层对降雨的截留。

### 1 植被冠层截留模型构建

植被冠层截留降雨是一个复杂的过程, 它受降雨量、降雨强度、环境状况、植被群落结构等许多因素的影响和制约<sup>[1-7]</sup>。植被冠层截留量大小还与降水前树叶干旱程度有很大关系, 即如果降水发生前, 该地区长期干旱, 则植被冠层可能截留相当大数量的降水<sup>[4-5]</sup>。如果前期已有较大降水, 植被冠层截留已达到它的极限值, 则植被冠层截留量就不会再增加。但在实际应用研究中, 很难将其作为参数参与计算。植被层截留降雨的过程十分复杂, 影响因素较多, 缺乏理想的模型加以定量描述。

本文研究以文献[7]提出的模型为基础, 假定植被截留  $E_1$  同降水量  $P$  满足如下函数关系:

$$E_1(P) = \sigma(P) \cdot P \tag{1}$$

式中  $\sigma(P)$  为截留系数, 是  $P$  的函数。

对于一个给定的植被类型及其叶面积指数 LAI, 存在一个临界降水量  $P^*$ 。当  $P < P^*$  时, 通过植被的降水完全被截留,  $E_1$  与  $P$  呈线性关系, 其斜率  $\tan\beta = 1$ ; 当  $P = P^*$  时,  $E_1$  达到最大值  $E^*$ ; 当  $P > P^*$  时,  $E_1$  保持在其最大值  $E^*$  水平上。 $E^*$ 、 $\sigma^*$ 、 $P^*$  分别用下列公式计算:

$$E_1^* = f \cdot \text{LAI} \cdot h \tag{2}$$

$$\sigma^* = f \tag{3}$$

$$P^* = h \cdot \text{LAI} \tag{4}$$

则植被截留降水量为:

$$\sigma(P) = \begin{cases} \sigma^* P & P \leq P^* \\ E_1^* & P > P^* \end{cases} \tag{5}$$

式中  $f$  为植被覆盖度 ( $0 \leq f \leq 1$ );  $h$  为叶面最大持水量。本文假定存在一个临界降雨量  $P$ , 当降雨量大于最大截留量时, 对于给定的植被类型最大截留量为:

$$I = f \cdot \text{LAI} \cdot h \tag{6}$$

式中  $f$  为植被覆盖度; LAI 为叶面积指数;  $h$  为叶面最大持水量。

当降雨量小于最大截留量时, 降雨并非完全被截留, 其截留量由植被覆盖度决定, 截留量为:

$$I = fP \tag{7}$$

式中  $P$  表示降雨量。根据降水量的涵义, 植被层

的最大截留水量指单位面积上植被所能截留的最大降水量, 即聚积在叶面(水平面)上的水层深度。在植被类型一定的情况下, 植被层截留水量与叶面积指数、植被覆盖度成正比关系。由于式(6)和式(7)中的参数  $f$ 、LAI、 $h$  都可以利用遥感数据精确确定, 并结合气象降雨资料, 植被层截留降水量可以被严格的计算, 并且物理意义明确。

### 2 降水截留的遥感定量反演

在植被覆盖度、叶面积指数和植被叶面最大持水度等参数计算的基础上, 对岷江上游毛儿盖地区植被截留水量进行了反演<sup>[8-9]</sup>。图1为基于2001年9月 ETM 遥感数据植被冠层截留量定量反演结果。图2为基于2001年11月遥感 ASTER 遥感数据植被层截留量定量反演结果。

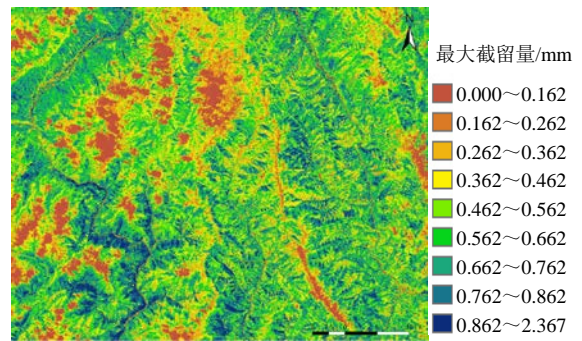


图1 基于 ETM 遥感数据植被冠层截留量反演结果

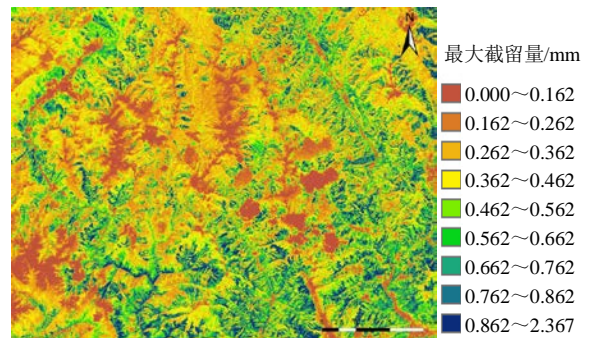


图2 基于 ASTER 遥感数据植被冠层截留量反演结果

从图1和图2遥感定量反演结果可以看出, 植被冠层截留量与植被分布吻合较好。植被较好的区域植被层截留量较高, 在干旱河谷段、亚高山草甸等植被较差的地区植被层截留量较低。即在降雨条件相同情况下, 植被冠层截留量与植被群落结构、叶面积指数、枝叶光洁程度、枝杈开张角度、林下植物的种类及其覆盖度有很大关系。结合研究区植被分类图, 在ARCGIS9.1下统计分析ETM数据的结果表明: 研究区高山草甸最大截留量为1.116 mm, 平

均截留量为0.394 mm; 灌丛最大截留量为1.737 mm, 平均截留量为0.421 mm; 针阔混交林最大截留量为2.142 mm, 平均截留量为0.741 mm; 针叶林最大截留量为2.367 mm, 平均截留量为0.809 mm; 阔叶林最大截留量为2.008 mm, 平均截留量为0.683 mm; 对于岷江上游毛儿盖地区植被来说, 植被层的平均截留量为0.634 mm。经空间统计分析ASTER图像数据的反演结果表明: 研究区高山草甸最大截留量为0.638 mm, 平均截留量为0.171 mm; 灌丛最大截留量为1.035 mm, 平均截留量为0.260 mm; 针阔混交林最大截留量为1.985 mm, 平均截留量为0.683 mm; 针叶林最大截留量为2.104 mm, 平均截留量为0.738 mm; 阔叶林最大截留量为1.919 mm, 平均截留量为0.608 mm; 对于岷江上游毛儿盖区的植被来说, 植被层的平均截留量为0.462 mm。

通过对ETM图像数据和ASTER图像数据的反演结果分析发现, 由ASTER数据反演的植被冠层最大截留量, 整体上比ETM数据反演的统计分析值要小, 这与遥感图像时相有关。ETM数据采集时间为9月中旬, 该时间是植被生长阶段, 植被盖度和叶面积指数总体都较大; ASTER数据获取时间为11月, 该时间已是秋末冬初, 研究区已有部分雪覆盖, 落叶林植被的叶片已经凋落, 草甸也已枯萎, 故植被截留降水量明显减少。针叶林冠层截留量多变化在0.58~2.367 mm之间, 阔叶林生长季的冠层截留量一般变化在0.6~2.008 mm之间, 冬季无叶时依树种不同降低到夏季数值的38%~65%不等; 遥感数据的时相对针叶林最大截留量影响较小, 针阔混交林次之, 对灌丛、草甸的影响较大。

### 3 模型验证及反演结果评价

鉴于研究区降雨的空间准确模拟难度较大, 并且在研究区大量布点进行实测植被冠层截留量也是不可行的, 所以以整个研究区为尺度对植被冠层截留模型进行精确验证非常困难。为了较准确的评价实验区植被截留模型, 除了利用少量的实际观测点数据外, 本文同时采用文献[10]中部分有关生态水资源研究成果, 作为评价研究区植被冠层截留模型及其反演结果的主要依据之一; 并辅助利用文献<sup>[1-6, 10-14]</sup>中关于植被水文效应的研究成果, 对本文植被冠层截留模型的反演结果对比分析。

考虑到降雨条件一定的情况下, 植被冠层截留量主要与植被类型、植被群落分布和植被覆盖度等因素密切相关。将植被冠层截留量反演结果图与植

被类型分布图进行叠置分析, 可以对植被冠层截留模型进行初步验证和反演结果评价。

图3和图4为实验区生态环境本底遥感调查植被分布图分别与ETM数据和ASTER数据反演的植被冠层截留量分布图的叠加结果图, 植被分类分级代码含义如表1所示。图中曲线为植被类型分布界线, 数字为植被类型代码。从图中可以看出, 反演的植被冠层截留量与生态环境本底遥感调查植被分类图在空间序列上能很好吻合。如常绿林(分级代码为312)比天然草地(分级代码为333)分布区域的植被冠层截留量大; 灌木林(分级代码为331)比灌草过渡带(分级代码为332)分布区域的植被冠层截留量大; 有云或雪覆盖的区域、河流(分级代码为511)、裸岩(分级代码为623)和采伐迹地(分级代码为342)等无植被生长区域植被冠层截留量为零。

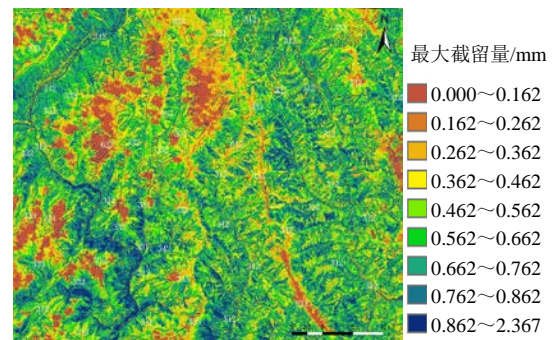


图3 植被分布图与ETM反演植被冠层截留量的结果叠置图

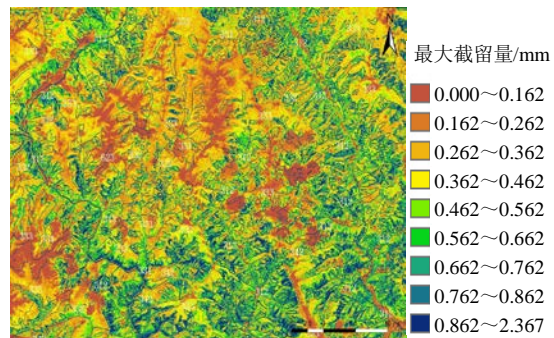


图4 植被分布图与ASTER反演植被冠层截留量的结果叠置图

同时, 本文对文献<sup>[1-16]</sup>中的研究结果进行了查阅和分析, 文献[15]对岷江上游各种植被类型冠层截留量的研究表明岷江上游植被的平均截留量为0.572 1 mm, 其中植被较好的地区, 如卧龙、米亚罗地区冠层截留量较大, 而干旱河谷和高山草甸等区域的冠层截留量相对较低。文献[16]对长江上游各种植被类型的研究表明, 林冠降雨截留量最大的是云、冷杉, 可达1.4 mm左右; 其次是落叶松林、铁杉和桦林混交林, 为1.06~1.23 mm; 再次是亚热带



的常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林和常绿硬叶阔叶林, 为0.9 mm以上; 竹林和落叶阔叶林为0.7~0.85 mm; 各种植被类型森林植被最大截留量平均为0.97 mm。据美国测定, 松科和铁杉属为0.5~3.0 mm, 七叶树科、槭树属、榆属、栎属、桦木属等阔叶树为0.03~2.0 mm, 而云杉属有的则达9.1 mm。在比较不同树种时, 发现针叶林多变化在0.58~2.82 mm之间, 西特喀云杉在模拟刮风、无风和连续降雨条件下分别为2.08、2.82和3.68 mm; 阔叶林生长季一般在0.6~2.6 mm之间变化, 冬季无叶时依树种不同降低到夏季数值的38%~65%不等。该文反演结果和文献<sup>[3, 6, 10-12]</sup>中的相关研究结果一致。

表1 实验区2001年9月生态环境本底遥感调查植被分类表

分类代码	213	214	241	244	311	312	313	323	3231
实际含义	水浇地	旱地	果园套种农作物用地	农林复合区	落叶林	常绿林	混交林	防护林	防护林幼林地
分类代码	325	331	332	333	342	511	513	621	623
实际含义	其他林	灌木林	灌草过渡带	天然草地	采伐迹地	河流	湖泊	宜林草荒地	裸岩

#### 4 结论与探讨

根据对岷江上游研究区的实地踏勘和定位观测研究, 综合利用ETM和ASTER遥感数据、地面实测数据和常规观测数据等, 根据森林水量平衡原理, 以遥感图像中单个像元作为测算单位, 建立了植被冠层截留量遥感定量反演模型。利用研究区的实测数据、2001年生态环境本底遥感调查数据和水文气象数据对上述模型遥感反演结果进行验证和精度分析。通过分析发现, 针叶林冠层截留量多变化在0.58~2.367 mm之间, 阔叶林生长季的冠层截留量一般变化在0.6~2.008 mm之间,

冬季无叶时依树种不同降低到夏季数值的38%~65%不等; 遥感数据的时相对针叶林最大截留量影响较小, 针阔混交林次之, 对灌丛、草甸的影响较大。结果表明, 本文所建模型反演的植被冠层截留量和植被分布状况一致, 在降雨条件一定的情况下, 植被冠层截留量主要与植被类型、植被群落分布和植被覆盖度等因素密切相关。即植被发育旺盛的地方植被截留量相对较大, 针叶林冠层截留量大于阔叶林; 并且该文反演结果和文献<sup>[3, 6, 10-12]</sup>中的相关研究结果一致。这表明本文的模型能较好反应

研究区植被冠层截留量的实际状况, 模型反演结果比较理想。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘昌明, 孙 睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 9(3): 251-258.  
LIU Chang-ming, SUN Rui. Ecological aspects of water cycle: Advances in soil-Vegetation-atmosphere of energy and water fluxes[J]. Advances in Water Science, 1999, 9(3): 251-258.
- [2] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 452-458.  
LIU Shi-rong, SUN Peng-sen, WANG Jin-xi. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 452-458.
- [3] 夏 军, 左其亨. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 256-261.  
XIA Jun, ZUO Qi-ting. Advances in international hydrological science research[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(3): 256-261.
- [4] HOERMANN G. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 79: 131-148.
- [5] WATANABE T, MIZUTANI K. Model study on micro-meteorological aspects of rainfall interception evergreen broad-leaved forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 80: 195-214.
- [6] 刘丽娟, 咎国盛, 葛建平. 岷江上游典型流域植被水文效应模拟[J]. 北京林业大学学报, 2006, 26(6): 20-23.  
LIU Li-juan, ZAN Guo-sheng, GE Jian-ping. Vegetation hydrological effect model of typical watershed in the upstream of Minjiang valley[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 26(6): 20-23.
- [7] 仪垂祥. 植被截留降水公式的建立[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 47-49.  
YI Chui-xiang. Research on a formula of rainfall interception by vegetation[J]. Journal of Soil Erosion and Water Conservation, 1996, 2(2): 47-49.
- [8] 李小文, 王锦地, 朱重光. 遥感模型的定量反演研究[D]. 北京: 科学出版社, 1995.  
LI Xiao-wen, WANG Jin-di, ZHU Chong-guang. The Quantitative inversion study of Remote sensing model[D]. Beijing: Science Book Concern, 1995.
- [9] 唐世浩, 朱启疆, 闫广建. 遥感地表参量反演的理论与方法[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 37(2): 267-270.  
TANG Shi-hao, ZHU Qi-jiang, YAN Guang-jian. Theories and methods of terrstrial parameter extraction from remote sensing[J]. Journal of Beijing Normal University(Nature Science), 2004, 37(2): 267-270.
- [10] 杨武年, 袁佩新, 万新南, 等. 四川省岷江中上游生态环境遥感综合调查与评价, 863-308-21(6)[R]. 成都: 成都理工大学档案馆, 2001.

- YANG Wu-nian, YUAN Pei-xin, WAN Xin-nan. The study report: the ecological environment integrative survey and evaluation in the Minjiang upper river based on remote sensing, 863-308-21(6)[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology Archives, 2001.
- [11] 李玉霞. 岷江上游毛儿盖地区生态水信息指标参数遥感量化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- LI Yu-xia. Quantitative study of eco-water information indices based on remote sensing images in Mao-ergai district of upper Minjiang river[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [12] LIU Jia-gang. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy[J]. *EcoModellin*, 2004, 42: 111-123.
- [13] JACKSON T J, CHEN Dao-yi, COSH M, et al. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(7): 475-482.
- [14] ZHANG Hong-ying, WU Bin, PENG Qi-cong. An improved algorithm for image edge detection based on lifting scheme[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2005, 3(2): 113-116.
- [15] 李崇巍, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 岷江上游植被冠层降水截留的空间模拟[J]. *植特生态学报*, 2005, 29(1): 60-67.
- LI Chong-wei, LIU Shi-rong, SUN Peng-sen, et al. Model canopy rainfall interception in the upper watershed of the Minjiang River[J]. *Acta Phytocologica sinica*, 2005, 29(1): 60-67.
- [16] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地的主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 352-362.
- SHI Pei-li, WU Bo, CHENG Gen-wei, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangze basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 352-362.

编辑 漆蓉

· 电子科技大学科研成果介绍 ·

## 射频前端系统中的无源电路电磁建模及关键技术研究

本项目取得下列重要进展: (1) 深入研究遗传算法和空间映射算法, 并提出了新的改进遗传算法、空间映射算法等现代高效电路设计方法, 分别开发了基于上述两种算法的射频电路电磁优化设计软件, 并将其成功地应用与滤波器、天线等射频前端无源电路设计中; (2) 提出了基于时域有限差分法的复杂结构自适应网络剖分技术, 并通过数值实例验证了其高精度、高稳定特性, 在此基础上开发了适用于复杂射频前端电路分析的时域有限差分法软件平台; (3) 提出了能够分析射频前端电路中任意复杂集总电路网络时的时域有限差分法模型, 进一步扩展时域有限差分法在集总电路研究中的应用范围; (4) 首次将基于知识的人工神经网络和基因跳变遗传算法引入天线设计当中, 并利用这些模型成功地设计出紧凑的超宽带天线; (5) 创新性地提出了一系列会对不同射频前端应用环境的滤波器、耦合器、集成天线以及电磁兼容电路等电路结构。

### 8 mm LFMCW雷达实验系统

利用毫米波频段和极大时宽带宽积线性调频连续波(LFMCW)信号的优良LPI性能, 完成了8 mm LFMCW雷达实验系统的研制。实验系统采用了一系列高速度、大规模、可编程新型器件, 信号处理速度快、工作稳定、调试修改方便。在实验系统上完成了极大时带积LFMCW信号的产生与处理实验。其线性度校正技术已得到实际应用, 取得了良好的效果。

实验系统采用了数字式实时闭环高线性度校正、频域动态压缩、距离分段处理技术, 提高了信号的线性度, 改善了距离分辨力, 解决了作用范围与距离分辨力之间的矛盾。

主要技术指标:

发射信号功率: 100 mW

信号带宽: 200 MHz

信号时宽: 可变

距离分辨率: 1.5 m

线性度: 优于1/10 000

作用距离: 1~2 km

· 本刊编辑部 ·