

基于数字相关型全极化微波辐射计的灵敏度分析

党鹏举,何 征,李鹏飞

(中国航天科技集团公司五院西安分院,陕西西安 710100)

摘 要: 灵敏度是表征微波辐射计能够检测到最小亮温变化的能力,是微波辐射计一项重要指标. 本文针对数字相关型全极化微波辐射计,提出了一种使用相关器输出的计数值计算各通道灵敏度的方法,并通过了实验验证. 对比模拟通道灵敏度和数字通道灵敏度,分析了量化噪声和通道间串扰对灵敏度的影响.

关键词: 全极化微波辐射计; 数字相关; 灵敏度

中图分类号: TP732.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)10-1938-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.10.010

Sensitivity Analysis Based on Digital Correlation Fully Polarized Microwave Radiometer

DANG Peng-ju, HE Zheng, LI Peng-fei

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: Sensitivity is the ability of microwave radiometer to detect the minimum temperature change and is an important index of microwave radiometer. In this paper, a method of calculating the sensitivity of each channel by means of the output of the correlator is proposed for the digital correlation full polarized microwave radiometer. The effects of quantization noise and crosstalk on sensitivity of analog channel and digital channel are analyzed.

Key words: fully polarized microwave radiometer; digital correlation; sensitivity

1 引言

微波辐射计是一种用于测量物体微波热辐射的高灵敏度接收机,是被动微波遥感的主要工具. 传统的双极化微波辐射计可以测量海面风速、海面温度等地球物理参量,但不能准确地确定风向. 全极化微波辐射计不仅能够测量 V、H 方向的极化分量,同时能够通过正交极化分量得到复相关分量,得到第三和第四 Stokes 分量,进而实现反演海面风场的目的. 2003 年由美国海军研究实验室与国家极轨工作环境卫星系统综合项目办公室联合研制出了世界上第一个星载全极化微波辐射计 Windsat,这是首个用于测量海面风速和风向的辐射计,其观测数据成功验证了星载全极化微波辐射测量具有遥感风场的能力. 直接相关型全极化微波辐射计输出 4 个 Stokes 亮温表达式如下^[1]:

$$T_B = \begin{bmatrix} T_v \\ T_h \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{\eta \cdot k} \begin{bmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle \\ \langle |E_h|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle |E_v E_h^*| \rangle \\ 2\text{Im}\langle |E_v E_h^*| \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 T_α ($\alpha = v, h, 3, 4$) 分别对应 4 个 Stokes 亮温, λ 为波长, k 为 Boltzmann 常数, η 为波阻抗, E_v 、 E_h 分别为垂直和水平方向的电场强度, $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均. 相关器作为全极化相关型微波辐射计的核心部件,它的性能直接影响辐射计的测量结果. 随着对风场测量精度和带宽的要求越来越高,传统的模拟相关技术已经无法满足其要求,数字相关技术能同时实现垂直极化和水平极化的自相关和互相关处理. 与模拟相关器相比,数字相关器能够利用资源换取速度,利用超大规模集成电路实现宽带数字相关处理.

灵敏度定义为微波辐射计能够检测到的最小输入

亮温变化,是微波辐射计的一项重要指标. T_3 、 T_4 是反演海面风向的主要参量,其亮温灵敏度对后端反演过程至关重要^[2,3]. 对于全极化微波辐射计,国内外尚无明确的计算其灵敏度的方法,全极化微波辐射计输入的 4 个 Stokes 亮温的变化会引起数字相关器的输出计数值的变化,文章基于数字相关型全极化微波辐射计系统,提出了一种新的方法计算其输出 4 个 Stokes 亮温的灵敏度,该方法直接对数字相关器输出的两个自相关和两个互相关的计数值进行计算,得到能够引起数字相关器计数值改变的 4 个 Stokes 亮温的最小亮温变化.

2 数字相关型全极化微波辐射计系统

数字相关型全极化微波辐射计采用相同的低噪声、滤波器、混频器等,对天线输出的 V、H 极化信号进行超外差式接收,每路信号经过功分器后一部分直接模拟检波输出,另一部分再经过 0/90 功分器后输出 I、Q 两路中频信号送入数字相关器,经过相关处理得到 Stokes 参数亮温度的 T_v 、 T_h 、 T_3 、 T_4 分量. X 波段数字相关型全极化微波辐射计系统组成如图 1 所示^[4,5].

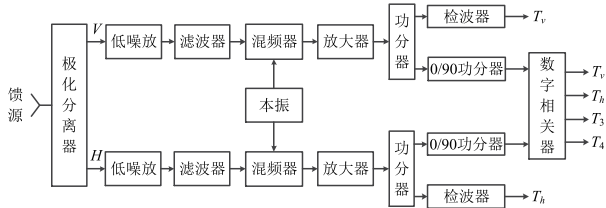


图1 X波段数字相关型全极化微波辐射计系统框图

辐射计系统参数如表 1 所示.

表 1 数字相关型全极化微波辐射计参数设置

参数	指标
中心频率	10.7GHz
带宽	300MHz
积分时间	3ms
采样率	1.5GHz
采样位数	8bit

垂直极化分量和水平极化分量两路模拟信号经过下变频和增益放大之后,每路信号经功分器分为两路,一路检波后进入信号采集器经 16bit 模数转换并累加输出,另一路再经过 0/90 功分器分为 I 路和 Q 路正交信号进入数字相关器. 数字相关器输入为 V_I 、 V_Q 、 H_I 、 H_Q 共 4 路模拟信号,经过 8bit 采样后转换为数字信号,之后对输入的 4 路信号分别进行自相关和互相关计算,输出 $V_I \cdot V_I$ 、 $V_Q \cdot V_Q$ 、 $H_I \cdot H_I$ 、 $H_Q \cdot H_Q$ 、 $V_I \cdot H_I$ 、 $V_Q \cdot H_Q$ 、 $V_I \cdot H_Q$ 、 $V_Q \cdot H_I$ 共 8 路信号,4 个 Stokes 亮温对应的数字相

关器输出计数值表达式为^[6]:

$$\begin{aligned} N_v &= \langle V_I \cdot V_I + V_Q \cdot V_Q \rangle \\ N_h &= \langle H_I \cdot H_I + H_Q \cdot H_Q \rangle \\ N_3 &= \langle V_I \cdot H_I + V_Q \cdot H_Q \rangle \\ N_4 &= \langle V_I \cdot H_Q - V_Q \cdot H_I \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

其中 N_α ($\alpha = v, h, 3, 4$) 表示相关器输出计数值, $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均.

3 灵敏度分析

对于传统的微波辐射计而言,输出电压与输入亮温呈线性关系,灵敏度定义为输出端能检测到引起电压改变的最小亮温变化,其基本表达式为:

$$\Delta T_\alpha = \frac{V_{\alpha,rms}}{dV_\alpha/dT_\alpha}, \quad \alpha = v, h \quad (3)$$

其中 $V_{\alpha,rms}$ 为输出电压的标准差, dV_α/dT_α 为输出电压对亮温的导数,对于全功率型微波辐射计,其灵敏度可通过下式计算:

$$\Delta T_\alpha = \frac{T_{\alpha,sys}}{\sqrt{B\tau}}, \quad \alpha = v, h \quad (4)$$

其中 $T_{\alpha,sys}$ 为系统等效输入噪声温度, B 为接收机 3dB 带宽, τ 为辐射计积分时间,对于本系统,积分时间指模拟信号经 AD 转换后平均输出一个累加值的时间.

由式(1)可得 T_3 、 T_4 分量的等效输入噪声温度为:

$$T_{3,sys} = T_{4,sys} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{T_{v,sys} \cdot T_{h,sys}} \quad (5)$$

对 T_3 、 T_4 分量来说,在 V、H 通道响应相同的情况下,带宽和积分时间与 V、H 通道相同,结合式(4)和(5)可得 T_3 、 T_4 分量的灵敏度相等,表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta T_3 = \Delta T_4 &= \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{T_{v,sys} \cdot T_{h,sys}}}{\sqrt{B\tau}} \\ &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{T_{v,sys}}{\sqrt{B\tau}} \cdot \frac{T_{h,sys}}{\sqrt{B\tau}}} \\ &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta T_v \cdot \Delta T_h} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 ΔT_v 、 ΔT_h 分别为 T_v 、 T_h 亮温的灵敏度.

上式对于模拟相关器和数字相关器均适用,因此,可以通过求 T_v 、 T_h 通道的灵敏度的乘积来计算 T_3 、 T_4 的灵敏度. 对于数字相关系统,由于存在量化噪声、通道间相互串扰等因素,因此上式只能得到一个近似结果,为了得到数字相关系统灵敏度的精确值,以下讨论针对数字相关系统灵敏度的专用计算方法.

由式(1)可知,全极化微波辐射计输出的自相关值 $\langle |E_v|^2 \rangle$ 和 $\langle |E_h|^2 \rangle$ 分别正比于 T_v 、 T_h , 互相关值 $2\text{Re} \langle |E_v E_h^*| \rangle$ 和 $2\text{Im} \langle |E_v E_h^*| \rangle$ 分别正比于 T_3 、 T_4 . 由式(2)可知,对于数字相关型全极化微波辐射计,数字相关器输出计数值 N_v 和 N_h 即为自相关值 $\langle |E_v|^2 \rangle$ 和 $\langle |E_h|^2 \rangle$, N_3 和 N_4 即为复相关值 $2\text{Re} \langle |E_v E_h^*| \rangle$ 和 2Im

$\langle |E_v E_h^*| \rangle$, 即数字相关器输出计数值 N_α 正比于输入亮温 T_α ($\alpha = v, h, 3, 4$). 根据灵敏度基本定义, 我们可以考虑通过输出端能够检测到引起计数值改变的最小亮温变化表征其灵敏度:

$$\Delta T_\alpha = \frac{\bar{N}_{\alpha,rms}}{dN_\alpha/dT_\alpha}, \quad \alpha = v, h, 3, 4 \quad (7)$$

其中 $\bar{N}_{\alpha,rms}$ 和 dN_α 分别为辐射计系统观测不同矢量时输出计数值的平均标准偏差和均值差, dT_α 为输入不同矢量时亮温差. 该方法利用数字相关器输出的计数值, 无需求得最终亮温即可计算出 4 个 Stokes 亮温的灵敏度, 过程简单, 易于实验验证. 在实验室环境下, 利用全极化微波辐射计观测全极化源, 对其输出灵敏度进行测试.

4 实验验证与讨论

在实验室环境下, 使用全极化定标源源体对全极化微波辐射计进行测试. 全极化定标源主要由两个参考负载(一个为冷负载, 垂直放置于侧面, 另一个为热负载, 水平放置于底面)、极化栅网、相位延迟板组成, 可以输出标准的全 Stokes 亮温度信号^[7,8], 姿态控制装置、温度控制装置和温度测量装置通过电缆与全极化定标源连接, 完成对源体的控制与测量. 全 Stokes 亮温度产生原理如图 2 所示, 过程描述如下:

(1) 参考负载为发射率大于 0.999 的宽口径辐射体. 通过对参考负载进行热控, 可以使水平放置的参考负载产生 T_{v0} 和 T_{h0} 分量, 垂直放置的参考负载产生 T_{v1} 和 T_{h1} 分量;

(2) 经与极化栅网相互作用后, 并调整极化栅网线

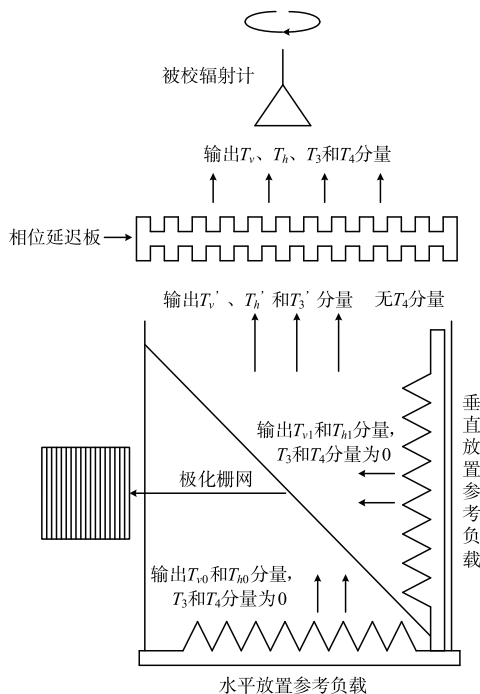


图2 全极化定标源全斯托克斯分量产生示意图

栅与辐射计天线极化方向夹角 θ , 可以产生 T'_v 、 T'_h 和 T'_3 分量;

(3) 相位延迟板对不同极化方向上的电磁波产生不同的相移, T'_v 、 T'_h 和 T'_3 分量通过相位延迟板后, 新生成第四 Stokes 分量 T_4 , 同时 T'_v 、 T'_h 和 T'_3 分量变化为 T_v 、 T_h 、 T_3 分量, 与 T_4 一起组成完整的 Stokes 分量.

通过改变栅网线栅方向与天线 V 极化方向之间的夹角 θ 和相位延迟板慢轴与辐射计 V 极化方向之间的夹角 φ , 理论上全极化定标源可以产生无限多组标准 Stokes 分量组合.

全极化定标源输出的 Stokes 亮温计算公式在参考文献中有详细分析^[9], 此处不再赘述, 测试前按照以下步骤进行实验准备工作:

(1) 将全极化定标源水平参考负载温度设置为 302.81K, 垂直参考负载温度设置为 278.01K, 两个负载中心贴热敏电阻并返回温度遥测;

(2) 极化栅网、相位延迟板上贴热敏电阻并返回温度遥测;

(3) 全极化定标源中心与馈源中心对齐, 两者所在平面平行, 且两平面相距 2mm;

(4) 馈源 V 极化基线与全极化定标源 $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 基线平行;

(5) 数字相关器输出数据通过 RS232 串口线传输至计算机;

(6) 全极化微波辐射计系统通电自测试.

全极化定标源在 $\varphi = 0^\circ$, θ 从 -90° 以 10° 间隔递增至 90° 时输出的 4 个 Stokes 亮温变化如图 3 和图 4 所示^[10].

由图中可以看出, 全极化定标源在 $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 时, T_3 、 T_4 亮温值均为 0K, 在 $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 时 T_3 、 T_4 亮温取最大值, 为便于灵敏度分析, 分别取 T_3 、 T_4 亮温为最大值和 0K 时为参考亮温进行测试, 测试时, 在全极化定标源的每种状态下, 全极化微波辐射计采集 10s 数据, 取平均后再进行处理.

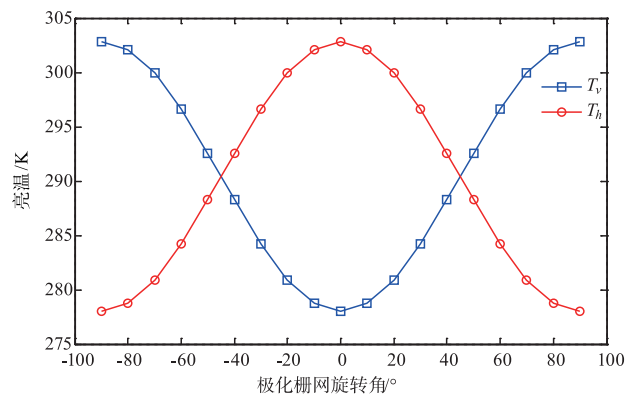


图3 全极化定标源输出 T_v 、 T_h 亮温曲线

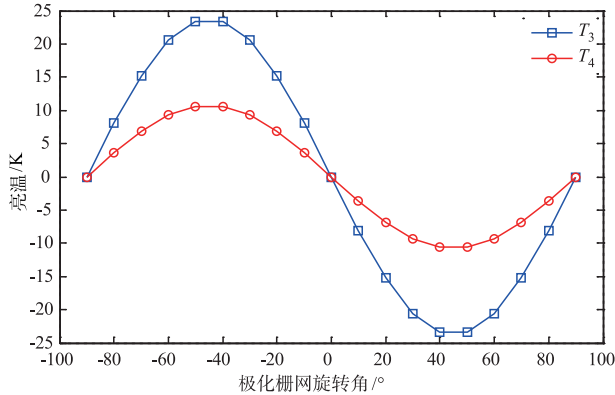


图4 全极化定标源输出 T_3 、 T_4 亮温曲线

当 $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$ 时,输入辐射计的 4 个 Stokes 亮温为 $T_1 = [278.01 \ 302.81 \ 0 \ 0]$,相关器输出的 8 路自相关和互相关计算结果如表 2 所示。

表 2 T_1 亮温对应数字相关器输出计数值

项目	均值	标准差
$V_I \cdot V_I$	89608834	94450
$V_Q \cdot V_Q$	86079950	90366
$H_I \cdot H_I$	93793632	98835
$H_Q \cdot H_Q$	106044275	107615
$V_I \cdot H_I$	124677	62970
$V_I \cdot H_Q$	68679	66565
$V_Q \cdot H_I$	89752	62591
$V_Q \cdot H_Q$	133650	65133

当 $\theta = 45^\circ, \varphi = 0^\circ$ 时,输入辐射计的 4 个 Stokes 亮温为 $T_2 = [289.03 \ 291.79 \ -23.73 \ -10.78]$,相关器输出的 8 路自相关和互相关计算结果如表 3 所示。

表 3 T_2 亮温对应数字相关器输出计数值

项目	均值	标准差
$V_I \cdot V_I$	91486768	94617
$V_Q \cdot V_Q$	87844506	93098
$H_I \cdot H_I$	91838998	97010
$H_Q \cdot H_Q$	1.04E+08	109019
$V_I \cdot H_I$	-1780733	62486
$V_I \cdot H_Q$	-844595	67138
$V_Q \cdot H_I$	914237	62716
$V_Q \cdot H_Q$	-1845220	64532

根据式(2)分别求出每组响应下四个分量输出的计数值,再分别计算其均值差和平均标准偏差。

计数值均值差为:

$$dN_\alpha = N_{\alpha,2} - N_{\alpha,1}, \quad \alpha = v, h, 3, 4 \quad (8)$$

平均标准偏差 $\bar{N}_{\alpha,rms}$ 为:

$$\bar{N}_{\alpha,rms} = \sqrt{\frac{N_{\alpha,rms1}^2 + N_{\alpha,rms2}^2}{2}}, \quad \alpha = v, h, 3, 4 \quad (9)$$

其中 $N_{\alpha,rms1}$ 、 $N_{\alpha,rms2}$ 分别为辐射计系统观测不同矢量时输出计数值的标准偏差。

通过以上计算,得出四个 Stokes 亮温对应的计数值如表 4 所示。

表 4 四个 Stokes 亮温矢量对应计数值

项目	N_v	N_h	N_3	N_4
平均标准偏差 $\bar{N}_{\alpha,rms}$	92431	103319	64061	64609
计数值均值差 dN_α	3642488	-4119233	-3884281	-1779905
亮温均值差 dT_α	11.02	-11.02	-23.73	-10.78

通过检波器输出的 V、H 通道电压,经过 16bit 模数转换及积分后输出,可以用式(3)计算其灵敏度.代入式(7)求得 T_3 、 T_4 分量灵敏度,代入式(6)求得理论 T_3 、 T_4 分量灵敏度,灵敏度统计结果如表 5 所示。

表 5 灵敏度统计表

项目	T_v	T_h	T_3	T_4
数字相关灵敏度 ΔT_α	0.2796	0.2764	0.3914	0.3915
理论数字相关灵敏度 $\Delta T_{\alpha 1}$	—	—	0.3931	0.3931
直接检波灵敏度 $\Delta T_{\alpha 2}$	0.2549	0.2533	—	—

由实验数据可以得出以下结论:

(1) 根据文章提出的计算方法,即通过式(7)得到的 T_3 、 T_4 实测灵敏度相差 0.0001,两者近似满足 $\Delta T_3 = \Delta T_4$,与理论分析结果一致。

(2) 通过求 T_v 、 T_h 通道灵敏度的乘积计算出的 T_3 、 T_4 灵敏度略大于实测值,这是因为在式(6)的推导过程中,我们认为 V、H 两个通道的带宽 B 相等,但实际系统中不可能存在两个通道带宽完全相等的情况,因此在本实验中,数字相关的实测灵敏度与理论灵敏度有 0.0017 的绝对偏差,对于灵敏度而言,这个量级的绝对偏差可以忽略不计.在近似情况下,数字相关型全极化微波辐射计输出 4 个通道的灵敏度满足以下关系式:

$$\Delta T_3 = \Delta T_4 = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta T_v \cdot \Delta T_h} \quad (10)$$

(3) 直接检波灵敏度比数字相关灵敏度较好,这是进入相关器后由各通道间的串扰以及量化比特数不同造成的,表 6 列出了数字量化位数与模拟相关灵敏度关系。

可以看出,当量化位数为 4bit 时,数字相关灵敏度可以达到模拟相关灵敏度的 99%,本实验采用的数字相关器量化位数为 8bit,以 V 通道为例,模拟相关灵敏度为 0.2549,以数字量化达到模拟相关的 99% 计算出的数字相关灵敏度为 0.2575,两者的绝对偏差为 0.0026,可以忽略不计.因此本实验中数字相关灵敏度和直接检波灵敏度的差异主要是由各通道间的串扰造

成的^[11]。根据实验结果,由串扰造成的 V 通道和 H 通道的绝对偏差分别约为 0.0247 和 0.0231。

表 6 数字量化位数与模拟相关灵敏度关系

量化位数	阶数	灵敏度(与模拟相关相比)
1bit	2	64%
1.6bit	3	81%
2bit	4	88%
2.6bit	6	93%
3bit	8	95%
3.6bit	12	98%
4bit	16	99%

5 结论

灵敏度是考核微波辐射计的一项重要指标,文章提出了数字相关型全极化微波辐射计灵敏度的计算方法,并结合 X 波段全极化微波辐射计系统,通过实验验证了计算方法的可行性与正确性,并对误差进行了分析。该计算方法简单有效,对数字相关型全极化微波辐射计的系统设计与性能研究提供了有效参考。

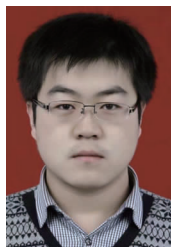
参考文献

- [1] 王振占. 海面风场全极化微波辐射测量-原理、系统设计与模拟研究[D]. 中国科学院空间科学与应用研究中心,2005.
- [2] 王蕊,史顺文,严卫. 利用全极化微波辐射计资料反演台风境内海面风场[J]. 地球物理学报,2014,57(3):407-409.
WANG Rui,SHI Shunwen,YAN Wei. Sea surface wind retrieval from polarimetric microwave radiometer in typhoon area [J]. Chinese Journal of Geophysics,2014,57(3):407-409. (in Chinese)
- [3] 王蕊,史顺文. 全极化微波辐射计海面风场反演实验[J]. 遥感信息,2014,12(4):258-260.
WANG Rui,SHI Shunwen. Experiment on polarimetric mi-

crowave radiometer sea surface wind vector retrieval[J]. Remote Sensing Information,2014,12(4):258-260. (in Chinese)

- [4] 吕容川,李浩,李一楠. 高精度相关型全极化微波辐射计极化接收技术研究[A]. 第四届高分辨率对地观测学术年会[C]. 武汉,2017.1-7.
- [5] 吕容川,李浩. 全极化微波辐射计系统方案设计技术研究[A]. 2010年五院科技委遥感有效载荷技术专业组学术年会[C]. 2010.
- [6] 陆浩,王振占. 全极化微波辐射计系统中高速数字相关器设计[J]. 电子学报,2011,39(12):2831-2835.
LU Hao,WANG Zhenzhan. Design of high-speed digital correlator in fully polarimetric microwave radiometer [J]. Acta Electronica Sinica,2011,39(12):2831-2835. (in Chinese)
- [7] J Lahtinen, M Hallikainen. HUT fully polarimetric calibration standard for microwave radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(3):603-611.
- [8] J Lahtinen, A J Gasiewski. A calibration method for fully polarimetric microwave radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(3):588-602.
- [9] J R Piepmeier, A J Gasiewski. Digital correlation microwave polarimetry: Analysis and demonstration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(10):2392-2410.
- [10] 孙晓宁,陈玲,程春悦. 全极化辐射计定标研究[A]. 国防无线电电学计量与测试学术交流会[C]. 西安,2015. 266-269.
- [11] 陆浩,王振占. 全极化微波辐射计数字化引入误差分析[J]. 电子学报,2013,41(6):1084-1087.
LU Hao,WANG Zhenzhan. The error analysis of digital technology in polarimetric microwave radiometer[J]. Acta Electronica Sinica,2013,41(6):1084-1087. (in Chinese)

作者简介



党鹏举 男,1988年8月出生,陕西渭南人.2013年在中国航天科技集团五院获工学硕士学位.现为中国航天科技集团五院西安分院设计师,主要从事微波遥感技术方面的研究,包括综合孔径微波辐射计系统设计及定标等.
E-mail:651414063@qq.com



何征 男,1989年11月出生,陕西西安人.2015年在中国航天科技集团五院获工学硕士学位.现为中国航天科技集团五院西安分院设计师,主要从事微波遥感技术方面的研究,包括太赫兹辐射计系统设计及定标等.