

实时定标微波辐射计的仿真研究^{*}

高 飞

(长春光学精密机械学院计算机系 长春 130022)

张俊荣

(中国科学院长春地理研究所微波遥感研究室 长春 130021)

摘 要 实时定标微波辐射计是一种新体制的微波辐射计,它能有效地消除系统增益波动和有效本机噪声波动的影响,适合星载应用。对以全功率微波辐射计为基础的实时定标微波辐射计进行了仿真研究,建立了系统各环节的仿真模型。在仿真试验中,采用了快速离散傅里叶变换处理信号,分析并缓解了由于频段跨度大带来的频率分辨率与采样点数之间的矛盾。仿真结果为优化设计提供了重要参考,并证明所建模型准确、有效,也为进一步实现星载环境仿真调试奠定了基础。

关键词 微波辐射计,实时定标微波辐射计,计算机仿真

1 引 言

微波辐射计在微波遥感器中占有重要的地位。它具有不受或很少受云、雨、雾的限制,不需要光照条件,具有全天候和全天时工作能力,有一定的穿透能力,可获得一定深度的信息等优点,受到世界各国的普遍重视。许多国家的气象卫星、海洋卫星和资源卫星都装载了微波辐射计。在我国,微波辐射计也已经进入星载多频段微波辐射计和微波成像仪的工程和预研阶段。由于星载微波辐射计运行环境特殊,很难在真实系统上分析调试。计算机仿真研究为其提供了一条在地面上重复试验分析性能,以达到上星运行要求的有效途径^[1]。

实时定标微波辐射计是以全功率微波辐射计为基础的一种新体制微波辐射计。因为它具有实时定标、可消除增益波动和本机噪声影响、技术难度低等优点,适合于星载使用,对其仿真研究有重要的现实意义。本文在建立了全功率微波辐射计的系统数学模型,并将其变换成可在计算机上运行的仿真模型的基础上,对实时定标微波辐射计进行了仿真研究。在仿真试验中,采用了快速离散傅里叶变换(FFT)的算法,并采取了以频域信号样本作为输入,检波前在频域中处理信号等措施,有效地提高了输出信号的频率分辨率。这些结果为进一步实现星载条件和

环境仿真调试奠定了基础。

2 微波辐射计系统模型

建立数学模型是仿真的前提和核心。微波辐射计属于连续系统,其数学模型有多种描述方式。下面分析实时定标微波辐射计的工作特点,建立系统的数学模型。

2.1 实时定标原理

由图1,实时定标微波辐射计是在全功率微波辐射计的基础上外加两个射频开关,两个恒温源,A/D转换器,单片机和输出显示电路等组成。通过输入开关,可以把天线端口或参考端口分别与接收机相连;参考开关则把输入开关与具有恒温度为 T_1 和 T_2 的参考源之一相连。

在任意一个定标周期内,接收机相继与参考源 T_1 、参考源 T_2 和天线 T_A 相连,其输出电压 V_1 、 V_2 和 V_A 可写成如下形式:

$$V_1 = G_S(T_1 + T_{REC}) \quad (1a)$$

$$V_2 = G_S(T_2 + T_{REC}) \quad (1b)$$

$$V_A = G_S(T_A + T_{REC}) \quad (1c)$$

通过(1a)和(1b)式可解出系统的增益 G_S 和本机噪声 T_{REC} 。将 G_S 和 T_{REC} 的值代入(1c),计算 T_A 得:

^{*} 国家863项目资助。

收稿日期:1998-06-10;收到修改稿日期:1998-09-07

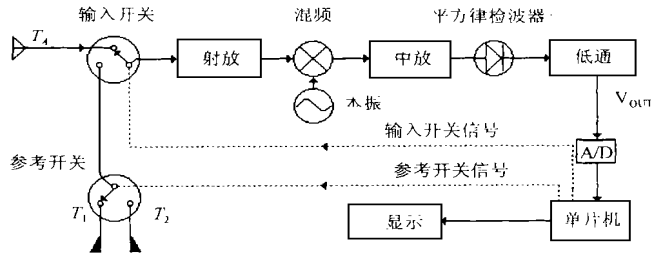


图 1 实时定标微波辐射计原理方框图

Fig. 1 Principle diagram of real-time calibrated microwave radiometer

$$T_A = \frac{(V_A - V_2)T_1 - (V_A - V_1)T_2}{V_1 - V_2} \quad (2)$$

按上式进行数据处理, 通过计算天线和高低温参考源输出电压的差值来消除本机噪声的影响, 通过电压差值的线性组合相除来消除增益波动的影响^[2]。每进行一次测量, 检测一次 V_1 和 V_2 , 进行一次定标, 即对接收机系统进行实时定标。这样即使在下一个周期内系统的增益 G_S 和本机噪声 T_{REC} 发生变化, 也能保证系统测量的准确性。

2.2 系统模型

实时定标微波辐射计是以全功率型微波辐射计为基础的, 所以, 应首先建立全功率微波辐射计系统数学模型, 才能实现对实时定标微波辐射计的仿真研究。因全功率微波辐射计工作通道以滤波放大为主, 采用频域模型可避免时域卷积等大工作量处理过程, 除平方律检波器外, 微波辐射计各个单元环节的频域传递函数简便、准确, 所以, 主要采用频域传递函数描述系统。

根据射频放大器对输入信号滤波放大, 即对射频的中间频率为 f_{RF} 、包含在带宽 B 内的射频频率分量进行放大的特点, 将其等效为一个二阶有共轭复数极点的带通滤波器, 其频率特性可用传递函数描述如下:

$$H_1(j\omega) = \frac{H_1}{1 + jQ \left[\frac{\omega}{\omega_{RF}} \text{地提} \frac{\omega_{RF}}{\omega} \right]} \quad (3)$$

式中, H_1 为滤波器的增益, ω_{RF} 为射频中间角频率, Q 为品质因数, 可用下式表示:

$$Q = \frac{\omega_{RF}}{\omega_{RF} - \omega_1} = \frac{f_{RF}}{f_2 - f_1} \quad (4)$$

式中, f_1, f_2 为增益下降 3dB 时的频率, $f_2 - f_1$ 为带宽。

混频器通过乘法完成频谱搬移, 即做如下运算:

$$f(t) \times \cos \omega_{LO} t \quad (5)$$

式中, $f(t)$ 为输入时域信号, ω_{LO} 为本地振荡角频率。根据傅里叶变换的频移性质, 对应式(5)的频域数学模型可用下式表示:

$$\frac{1}{2} [F(\omega + \omega_{LO}) + F(\omega - \omega_{LO})] \quad (6)$$

式中, $F(\omega \pm \omega_{LO})$ 为相应的傅里叶频谱函数。

混频器得到的信号频率是射频频率与本地振荡频率的差与和, 经过中频带通放大, 对差频滤波并滤掉和频便得到中频信号。因此, 中频放大器也可等效为带通滤波器, 其传递函数仍用(3)式表示。与射频放大器相比, 差别仅在于中心频率、带宽和增益等参数取值不同。

平方律检波器的功能是对中频信号进行检波。其时域的数学模型如下:

$$f_2(t) = a \times f_1^2(t) \quad (7)$$

式中, $f_1(t)$ 是中频放大器输出的时域信号, $f_2(t)$ 为检波后的时域信号, a 是平方律检波器功率灵敏度常数。平方律检波器是非线性环节, 准确的频域数学模型很复杂, 在频域中仿真有一定的难度。为保证整个系统仿真的准确性, 此环节在时域中处理。

微波辐射计的低通滤波器通常是一个简单的一阶 RC 电路, 频率特性可用传递函数描述如下:

$$H_2(j\omega) = \frac{H_2}{1 + j\omega RC} \quad (8)$$

式中, H_2 是滤波器的增益, 同时考虑了直流放大器的增益, RC 为积分时间常数。

微波辐射计属于电子学系统, 先验知识丰富, 从概念上和理论上可保证上述各环节数学模型具有较高的可信度。在仿真研究中, 上述各表达式中的中心频率、带宽、增益以及低通滤波器的时间常数均可在外部人为确定或调整。

由于数字计算机是对一些数值序列进行计算, 连续模型不能直接在数字计算机上进行仿真, 因此,

必须将它转变为离散模型。模型变换的方法很多,为了使获得的离散模型有较高的准确性和稳定性,采用了双线性替换法^[3]。即设替换关系:

$$\omega = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (9)$$

式中, T 为采样周期。将它代入各频域传递函数中,即可获得等价的离散模型。

3 计算机仿真研究

3.1 仿真试验方法

为了使已经得到的微波辐射计的数学模型,能准确有效地代表真实系统,应通过仿真试验对其进行考核和验证。设对中心频率 10GHz, 射频带宽为 200MHz 的信号进行仿真计算。由此可知, 射频放大器处理的是吉赫兹(GHz)级的高频信号;混频后中频放大器处理的是兆赫兹(MHz)级的中频信号;经检波器和低通滤波器输出的是百赫兹级的低频信号。可见,信号频程相差极大。如果处理得不得当,即使系统的数学模型是正确的,在输出端也不会得到有用的低频信息。因此,仿真试验的方法尤为重要。

本文在仿真试验中采用目前信号分析中最主要的数学工具——傅里叶变换进行信号处理。设信号样本是按等时间间隔 τ 得到的时间序列:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N \quad (10)$$

对这个序列人为地加上周期边界条件 $N_{N+j} = N_j$, $\forall j$ 。求 x_i 的傅里叶系数 a_k, b_k :

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N j x_i \cos\left[\frac{\pi i k}{N}\right] \quad (11)$$

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sin\left[\frac{\pi i k}{N}\right] \quad (12)$$

然后计算:

$$p_k = a_k^2 + b_k^2 \quad (13)$$

p_k 为时间序列中第 k 个频率分量对 x_i 的贡献。时间序列自然地包含了两个时间常数,即采样时间间隔 τ 和总采样时间 $N\tau$ 。这两个时间常数的倒数,分别决定两个特征频率

$$f_{\max} = \frac{1}{2\tau} \quad (14)$$

$$\text{和} \quad f_{\min} \equiv \Delta f = \frac{1}{N\tau} \quad (15)$$

这里 f_{\max} 是以此种采样数据所能观测到的最高频率, $f_{\min} = \Delta f$ 是两个相邻傅里叶系数的频率差,即

频率分辨率^[4,5]。

根据上述要求,微波辐射计输入应为有效频率范围在 9.9—10.1 GHz 的信号,输出信号频率在百赫兹左右,若设输出信号频率分辨率为 200 Hz,则按(14)式和(15)式可得:

$$\begin{aligned} N &= \frac{1}{\tau f_{\min}} = \frac{2f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{2 \times 10.1 \times 10^9}{200} \\ &= 10.1 \times 10^8 \end{aligned} \quad (16)$$

可见,要保证 200 Hz 的分辨率,采样点数高达 10.1×10^8 个之多。受计算机的计算时间和计算能力的制约,希望进行傅里叶变换的样本数尽量少。因此,频率分辨率和采样点数之间是矛盾的。若去掉 9.9GHz 以下无效的频率样本,样本数可被适当地减少。此时,取有效信号带宽为 400MHz,频率分辨率仍为 200Hz 时,频率样本数为:

$$N = \frac{400 \times 10^6}{200} = 2 \times 10^6 \quad (17)$$

微波辐射计的输入信号为一宽带有色噪声,其频谱仍为噪声。因此,可用均匀分布的伪随机数来形成有色噪声频域样本^[3]。根据(17)式,噪声频率样本数可取为 2×10^6 个,以在射频带宽为 200MHz 时,保证输出信号频率分辨率为 200Hz。检波前各级信号都以频域处理为主,即以频率样本作用于系统的频域数学模型,对检波前的各个环节进行考核;在检波级之后,频率样本已覆盖了全部工作带宽,无论频域还是时域处理,都能胜任。因此可用上述方法构成频率样本,进行仿真运算。这样做即避免了频率分辨率损失问题,也解决了频率分辨率和采样点数之间的矛盾。如进一步减少中频带宽,频域样本数还可减少。

针对检波环节的特殊性,其仿真运算是在时域中完成的。在检波前对所有的中频输出信号样本进行快速傅里叶反变换,将其转变到时域处理,在检波后完成快速傅里叶变换使其再回到频域,进行低通滤波处理。

为方便地观察各级仿真效果,需在每级频域信号处理之后,抽出一定的频域样本进行快速傅里叶反变换,显示时域效果。在低频段,因为使用离散采样总不能单值地确定被研究的信号的频率结构,所以会出现虚假的高频成分,造成混淆现象。采用截断法,将频谱的后半部分去掉,留下真实的频谱,可有效地降低混淆现象影响。

3.2 仿真结果分析

采用上述仿真试验方法,对图 1 系统中全功率

微波辐射计进行仿真计算所获得的各级时域信号及其频谱如图 2。图中信号强度均经过了归一化处理。根据微波辐射计天线接收目标辐射信号的特点,用均匀分布的伪随机数模拟构成其频域输入信

号样本。在这种输入下,图 2 所示的仿真运行结果与实际系统陆基运行结果一致。可见,建立的各个环节的系统数学模型是准确有效的,所采用的信号处理方式能够达到考核系统功能的目的。

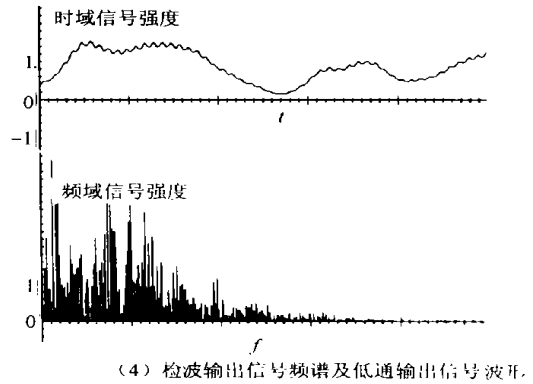
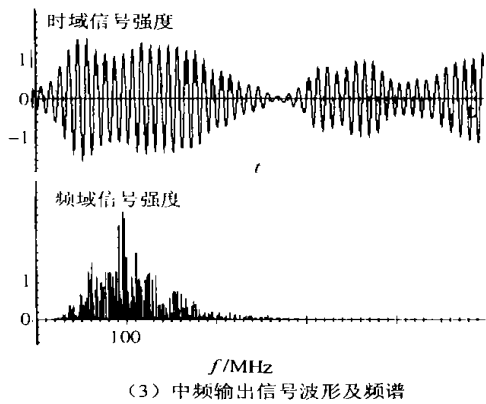
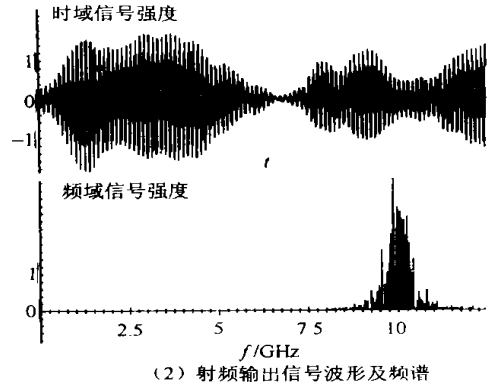
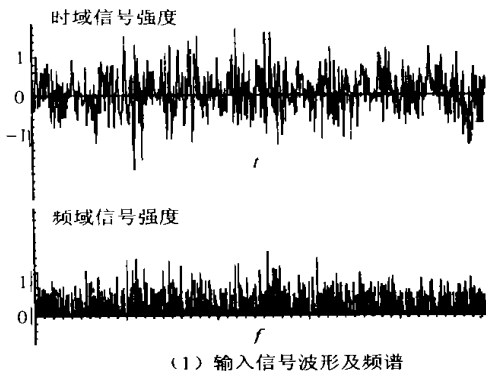


图 2 全功率微波辐射计各级信号波形及频谱

Fig. 2 Total-power microwave radiometer signal wave and frequency spectrum

采用上述方法构造两组具有不同亮温度特征的信号样本,分别作为高温参考源和低温参考源。周期地将天线输入信号、高温参考源信号和低温参考源信号加入图 1 所示系统,并将得到的 3 种输出按(2)式进行数据处理,即可实现对实时定标微波辐射计的仿真研究。

设在从基准源 T_1 、 T_2 和 T_A 之间切换的过程中,系统增益 G_S 固定不变,有效本机噪声 T_{REC} 经足够长时间的平均近似为实际值。给微波辐射计输入一个固定噪声温度,实时定标微波辐射计输出和未经补偿的全功率微波辐射计输出随系统增益和有效本机噪声变化情况的仿真计算结果列于表 1 和表 2。实时定标微波辐射计的实验结果如图 3 和图 4 所示¹⁾。从表 1 与图 3,表 2 与图 4 的对比看,仿真计算结果与实验结果相吻合。这从理论上进一步验证了实时定标微波辐射计对系统增益波动和有效本机噪

声波动有很好的补偿能力。

表 1 实时定标微波辐射计输出随系统增益变化的仿真计算结果

Table 1 Simulative computation results of the output values of real-time calibrated microwave radiometer with the system gain fluctuation

系统增益变化/%	微波辐射计输出/K	
	未被偿	被偿后
0.0	295.37	0.0
2.50	287.90	295.37
5.0	280.43	295.37
7.50	272.97	295.37
10.0	265.50	295.37
12.50	258.03	295.37
15.0	250.56	295.37
17.50	243.09	295.37
20.0	235.62	295.37

表 2 实时定标微波辐射计输出随系统有效本机噪声变化的仿真计算结果

Table 2 Simulative computation results of the output values of real-time calibrated microwave radiometer with the effective system noise fluctuation

系统有效本机噪声变化 / %	微波辐射计输出 / K	
	未被偿	被偿后
0.0	296.25	296.25
5.0	281.44	296.25
10.0	266.63	296.25
15.0	251.82	296.25
20.0	237.00	296.25
25.0	213.30	296.25
30.0	207.38	296.25
35.0	192.66	296.25
40.0	177.75	296.25
45.0	162.94	296.25

对于实际的实时定标微波辐射计,工作周期由接天线 T_A 的测量时间和接通基准源 T_1 、 T_2 的测量时间构成。一般地,为提高天线有效测量时间,在一个工作周期中,往往只测量一次基准源,而对天线信号进行多次测量。基准源的测量时间越长,有效本机噪声功率 T_{REC} 越稳定且越接近实际值,但由于工作周期变长,系统增益 G_S 波动的可能性越大。那么如何确定一个最佳工作周期,使得既能得到有效本机噪声功率 T_{REC} 稳定的真值,又能使系统增益 G_S 的波动在允许的范围之内,是一个优化系统设计的关键问题。通过调试实际系统来确定这样的工作周期是很困难的,而仿真研究则可方便地为此提供选择依据。在仿真研究中,可人为地设定 G_S 的不同微小变化值,观察对增益补偿效果的影响;同时对 T_{REC} 取各种不同时间的平均值,观测对 V_1 、 V_2

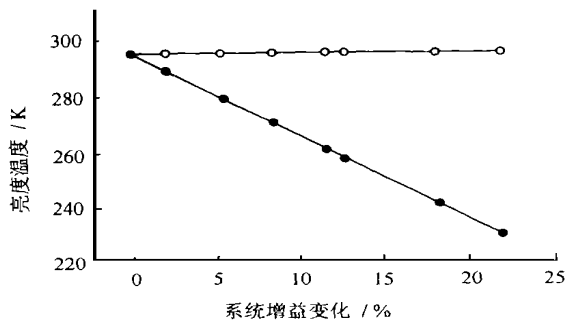


图 3 实时定标微波辐射计输出随系统增益的变化曲线
Fig. 3 The output curve of real-time calibrated microwave radiometer with the system gain fluctuation

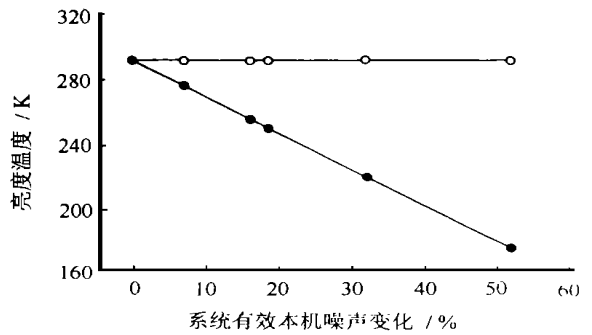


图 4 实时定标微波辐射计输出随系统有效本机噪声变化曲线

Fig. 4 The output curve of real-time calibrated microwave radiometer with the effective system noise fluctuation

和 V_A 均值的准确性的影响。综合考虑上述两方面的因素,对多种可能性进行比较,即可确定最佳工作周期,从而到达最优设计目标或决定实际系统的改进措施。

4 结 语

详细分析了实时定标微波辐射计的工作过程和全功率微波辐射计信号特点,以频率传递函数为主建立了系统的数学模型,并将其转换成能在计算机上运行的等效的离散仿真模型。通过输入噪声信号样本的仿真试验,验证了其准确性和有效性。在仿真试验中,信号处理是基础。关键要在其各级信号频差很大的情况下,在输出端检测出低频的有用信息。本文在仿真试验中,使用了快速离散傅里叶变换的数学工具,分析了频率分辨率与样本点数之间的矛盾,并采取了相应措施,缓解了这一矛盾。实时定标微波辐射计的仿真研究,提供了优化系统设计的途径。在此基础上,进一步考虑等效输入条件和星载空间条件等诸因素,即可进行有关系统仿真和环境仿真的研究工作。

参 考 文 献 (References)

- 1 Gao Fei, Zhang Junrong. Technology of Digital Simulation About Spaceborn Microwave Imaging Instrument. *Remote Sensing Technology and Application*, 1997, **12**(4). (In Chinese) [高飞, 张俊荣. 星载微波成像仪数字仿真技术. 遥感技术与应用, 1997, **12**(4).]
- 2 Li Jing, Zhang Junrong. Real-time Calibrated Microwave Radiometer. *Journal of Electronics*, 1998, **20**(2). (In Chinese) [李清, 张俊荣, 赵凯. 实时定标微波辐射计. 电子科学学刊, 1998, **20**(2).]
- 3 Wang Huigang. The Principle and Application of Computer Simu-

- lation· Changsha: National University of Defense Technology Press, 1994. (In Chinese) [王惠刚· 计算机仿真原理及应用· 长沙: 国防科技大学出版社, 1994.]
- 4 Deng Bixin· Signal Analysis Basis· Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1994. (In Chinese) [邓必鑫· 信号分析基础· 北京: 北京理工大学出版社, 1994.]
- 5 Guan Zhizhong, Xia Gongluo· Signal and Linear System· Beijing: The Publishing House of People's Education, 1982. (In Chinese)

[管致中· 夏恭恪· 信号与线性系统(下册)· 北京: 人民教育出版社, 1982.]

作 者 简 介

高 飞, 女, 1959 年生, 长春光学精密学院计算机系副教授。1989 年 7 月获工学硕士学位。现于中国电子所攻读通信与电子系统专业博士学位。主要研究方向为星载微波遥感器的研制和计算机仿真等。

Simulative Study of Real-time Calibrated Microwave Radiometer

GAO Fei

(*Department of Computer, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Changchun 130022*)

ZHANG Jun-Rong

(*Microwave Remote Sensing Lab, Changchun Institute of Geography, CAS Changchun 130021*)

Abstract This paper presents the simulative study of real-time calibrated microwave radiometer based on the total-power microwave radiometer. The simulation models of every section are built. In the simulative test, the mathematical means of discrete Fast Fourier Transform is used in signal processing. The contradiction of frequency resolving power and the number samples by the large span of frequency range is analyzed and relieved. The real-time calibrated microwave radiometer is a new type of microwave radiometer. It can efficiently eliminate the influence of system gain fluctuations and effective system noise fluctuations. Thus, it is more suitable to spaceborne microwave remote sensing. The simulative results in this paper give an important reference to its optimizing design. Also they lay a foundation for the advancement of realizing spaceborne environment debugging.

Key words Microwave radiometer, Real-time calibrated microwave radiometer, Computer simulation, Signal processing.