

综合孔径微波辐射计二阶量化数字相关器研究

王飞鹏, 吴 季

(中科院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘 要: 微波辐射计作为一种无源遥感器, 在遥感技术领域有着巨大的应用前景. 传统的微波辐射计的空间分辨率受到天线孔径的限制. 综合孔径微波辐射计利用了干涉测量原理和复相关技术, 是一种可以有效地提高空间分辨率的新型辐射计. 本文针对综合孔径微波辐射计的数字相关器进行了深入研究, 分析论证了二阶量化数字相关器的工作机理, 并对采用该种相关器的系统的信噪比进行了分析. 初步的试验验证结果证明了该方案的有效性.

关键词: 微波辐射计; 干涉综合孔径; 数字相关器

中图分类号: TN931 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0450-04

1-Bit Digital Correlator for Synthetic Aperture Microwave Radiometer

WANG Fei-peng, WU Ji

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Microwave radiometer, as a passive remote sensing instrument, has broad application potential. However, these were limited by its spatial resolution given by its physical antenna aperture size. A synthetic aperture technology employing interferometry principle with complex correlators has been considered as a new type of instrument to give improved spatial resolution. In this paper, the authors analyzed the properties of a 1-bit digital correlator. The signal to noise performance has also been given to the systems that use this technology. Preliminary tests of such a system shows that it is a considerable technology to improve the system characteristic using the traditional analog complex correlators.

Key words: microwave radiometer; interferometry; digital correlator

1 引言

传统的微波辐射计由于其遥感机制的固有特点, 空间分辨率受到天线物理孔径以及波束驻留时间的限制, 使得星载系统的地面分辨力一般只在几十到百公里的数量级. 其辐射亮温测量灵敏度和空间分辨率之间还存在着制约. 也即当空间分辨力高时, 这时瞬时视场将变小, 由于卫星飞行速度一定, 此时为了成像进行扫描时, 波束在每一个像元的驻留时间就会减少, 因此对每一个像元的积分时间就会下降, 因而就影响了辐射亮温的分辨率.

针对传统微波辐射计的局限性, 如何提高星载被动微波辐射计的空间分辨率成为微波遥感领域的一个热点问题. 从目前国际上高分辨率微波辐射计发展的趋势看, 综合孔径技术是提高星载被动微波遥感器空间分辨力的一个有效途径. 该技术最早在六十年代应用于射电天文观测, 取得良好的效果.

综合孔径微波辐射计的工作原理是通过一些小孔径天线单元在不同空间位置上进行相互干涉测量, 然后对干涉测量

的结果进行傅立叶变换, 就得到了实际物体的辐射亮温. 两个小天线单元相位中心之间的连线称为基线, 为了获得不失真的图像, 基线应该覆盖所有的方向和长度, 称为在 u, v 域的可见度函数 V . 由于同样长度和方向的基线只需测量一次, 因此实际上由小天线合成的完整的天线孔径是相当稀疏的. 另外由于傅立叶变换对称性, 实际天线的最大孔径可以比直接测量时减少一半, 因此有时也称为半孔径天线. 由于天线孔径大, 重量减轻, 便于折叠, 因此可以实现较高的空间分辨率. 另外, 由于不需进行机械扫描, 因此不存在天线越大积分时间越短的现象^[1-3].

图 1 所示为一个二元干涉仪模型. 可见度函数 $V(u, v)$ 与天线口面处视在温度之间是一对傅立叶变换关系.

由于天线的方向图函数为已知, 天线口面的视在辐射两温可以由上式的傅立叶反变换反演获得:

$$T_{AP}(u, v) = \iint V(u, v) e^{-j2(\mu \sin \theta \cos \phi + \nu \sin \theta \sin \phi)} du dv / G(u, v)$$

综合孔径微波辐射计的核心部件是复相关器. 根据图像中最高空间分辨率的要求, 有多少个 (u, v) 采样点, 就需要作

多少次复相关.也即尽管经过稀疏的天线阵列单元数不是很多,但是其交叉相关的数量将很大.比如对一个 14 单元的一维综合孔径辐射计,其交叉相关数将达到 41.又比如对一个高分辨力的两维系统,其相关器的数量可达上万个.因此,对空间分辨力很高的

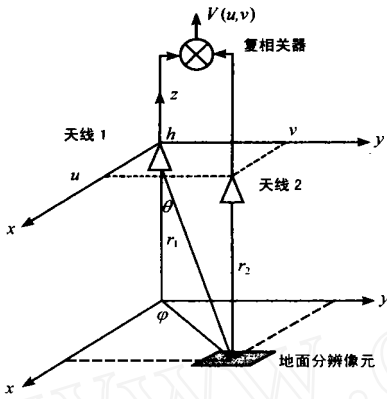


图 1 二元干涉仪模型

综合孔径辐射计,限制其空间分辨力进一步提高的因素将从天线本身转化为相关器数量太多的矛盾.这样,如何解决大量的交叉相关带来的相关器数量倍增的问题就是研究综合孔径微波辐射计必须解决的一个关键课题.其中一个可能的途径就是对每一个接收通道先进行量化,然后再在计算机中进行数字相关,称为数字相关器.目前国际上在数字相关器的研究领域仍有许多的问题尚待研究解决.本文将就这一领域对数字相关器技术做一初步的研究.

2 二阶量化特性数学分析

我们知道数字相关器相对于模拟相关器处理的信号是对模拟信号数字化处理后的数字信号.信号波形的数字化需要对电压的周期采样以及对采样结果的量化,最终以有限的位数来代替实际的波形.本文采用 1-bit 量化,也即二阶量化.这种量化方式显然大大的简化了数字电路的设计以及计算机对数据的运算过程,提高了系统的速度和可靠性.但是弊端也是很明显的,因为二阶量化电平将引入更大的噪声误差,因此将使整个系统的灵敏度降低.在工程上,这是一个矛盾体,但是从实际角度考虑,采用二阶量化的优点将大于缺点.实际上在射电天文学领域,对于信号的数字化过程普遍采用不超过 2-bit 的量化水平.在遥感应用领域中,由于在实际飞行过程中对于传感器的扫描以及驻留时间精度要求很高,因此对于系统的速度也要求很高.同时扫描的大量数据实时的存储或者传输下来,对系统的存储容量以及数据传输能力都将是很高的要求.采用二阶量化的方案,可以比较有效的解决这些问题.下面就二阶量化数字相关器的信号统计特性进行讨论.

模拟信号被量化后它的频率成份将发生改变,原来带限的信号量化后频谱会展宽,如果仍以原来的 Nyquist 速率采样,一些信息将会丢失,造成系统灵敏度下降.同时,因为量化已经不再是一个线性运算,因此量化波形相关器的

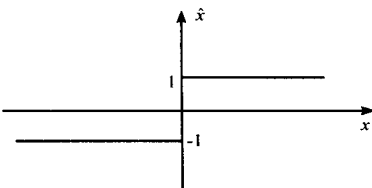


图 2 二阶量化特性图

输出与两个模拟信号之间的相关系数之间也不再是线性关系.因此,在对模拟信号数字化处理后,有三个问题需要考虑:(1)相关器输出与之间的关系;(2)灵敏度的损失;(3)过采样在多大程度上可以恢复丢失的灵敏度.

二阶量化特性如图 2 所示.

图中 x 代表模拟信号, \hat{x} 代表量化信号.从上图可以看出这种量化从某种意义上说就是对瞬时信号电压的识别.1-bit 系统通过对模拟信号的放大和固定钳制信号的符号电压来完成上述量化过程.当模拟信号量大于 0 电平时,输出为 1.当模拟信号小于 0 电平时,输出为 -1.两路数字信号的互相关系数为 $r_2 = \frac{N_{11} + N_{\bar{1}\bar{1}} - (N_{1\bar{1}} + N_{\bar{1}1})}{N}$.其中 N_{11} 是两路采样信号的值同时为 +1 时相关器输出的平均数, $N_{\bar{1}\bar{1}}$ 是 x 采样为 -1, y 采样为 +1 时相关器输出的平均数.在 Weinreb 的一篇关于数字辐射计的论文中^[4]可以得到二阶量化数字相关器输出与模拟相关器输出之间的关系:

$$r_2 = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \rho \quad \text{其中} \quad \rho = \frac{\langle x(t)y(t) \rangle}{\sqrt{\langle x^2(t) \rangle \langle y^2(t) \rangle}}$$

是输入信号的相关系数.

由上式可以看出,若已知 r_2 ,则可得到 ρ ,并且当 ρ 很小时, r_2 与 ρ 实际上成线性的关系.因此可以得到的结论是采用二阶量化的数字相关器,其相关结果完全可以反映输入两信号之间的关系.

3 二阶量化数字相关器信噪比分析

二阶量化数字相关器系统噪声主要来自两个因素:其一,系统接收机本身的噪声;其二,量化引入的噪声.下面首先讨论复相关器系统的信噪比,然后讨论量化引入的噪声.在此基础上,进一步讨论量化阶数以及采样速率对系统信噪比的影响.由文献[2,3,5]可知此时复相关器同相分量相关的信噪比和正交分量相关的信噪比.

同相分量相关的信噪比

$$SNR = \frac{\sqrt{\frac{V_r^2(u, v)}{1 + \frac{1}{2B} T_R^2 \frac{1}{a}}}}{T_R} = \frac{V_r(u, v)}{T_R} \sqrt{2B} a$$

正交分量相关的信噪比

$$SNR = \frac{\sqrt{\frac{V_i^2(u, v)}{1 + \frac{1}{2B} T_R^2 \frac{1}{a}}}}{T_R} = \frac{V_i(u, v)}{T_R} \sqrt{2B} a$$

其中 B 为接收机带宽, a 为低通滤波器积分时间.

对于数字复相关器,由于对模拟信号采样后进行有限位的量化,因此引入了量化噪声.相关器输出为 $r_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_i \hat{y}_i$, \hat{x}_i, \hat{y}_i 分别为在时间 t_i 时刻的输入信号 $x(t_i)$ 和 $y(t_i)$.其均值为 $\langle r_2 \rangle = \frac{2}{\pi} \rho$,其方差为 $\sigma_{r_2}^2 = \langle r_2^2 \rangle - \langle r_2 \rangle^2$.由此得二阶

$$\text{量化系统的信噪比为: } SNR_2 = \frac{\langle r_2 \rangle^2}{\sigma_{r_2}^2} = \frac{2 \sqrt{N}}{\sqrt{1 + 2 \sum_{q=1}^{\infty} R_q^2(q_s)}}$$

其中 N 为采样点个数, ρ 为模拟信号的相关系数, R 为自相

关函数, q 为整数, s 为采样间隔, $s = \frac{1}{f_s}$.

将二阶量化系统信噪比与模拟复相关器相比较可得二阶量化效率, 其表达式如下: $\eta_2 = \frac{SNR_2}{SNR} = \frac{2\sqrt{R_2^2(q,s)}}{\sqrt{1+2R_2^2(q,s)}}$,

其中 f_s 为采样速率. 当采样速率为 Nyquist 采样速率时, 取
 1. 当 $q=1$ 时, $\eta_2=0.64$. 当 $q=2$ 时, 系统的信噪比可以提高 1.17 倍, 即 $\eta_2=0.74$. 当 $q=3$ 时, 系统的信噪比可以提高 1.21 倍, 即 $\eta_2=0.77$. 由此可见当系统对模拟信号有限位量化后, 由于引入量化噪声, 系统信噪比会降低, 此时提高采样速率, 可以提高系统信噪比.

4 验证试验

图 3 是一个验证二阶量化数字相关器的实验系统框图. 图中功分器单元由一个 0 功分器和一个 90 功分器组成. 这两个功分器将输入的两路信号分成四路信号, 然后进入模拟信号处理单元. 模拟信号处理单元由四组放大器组成, 分别对每路模拟信号进行放大, 然后进行量化. 量化电路由四组过零比较器组成. 过零比较器输出的是模拟信号经过二阶量化后的量化电平信号. 其中两组分别由 0 功分器的 0 移相和 90 功分器 0 移相的量化信号在同相通道通过一个异或电路输入到数字信号处理单元. 另两组分别由 0 功分器的另一路 0 移相和 90 功分器 90 移相的两路量化信号在正交通道通过一个异或电路输入到数字信号处理单元. 数字信号处理单元主要由一个定时器和两个采样累加单元组成. 定时器确定了采样和累加的时间, 采样累加电路分别完成对量化电平在时间上的离散化和在高电平上的对时间的累加功能. 其中乘法器完成的是异或运算.

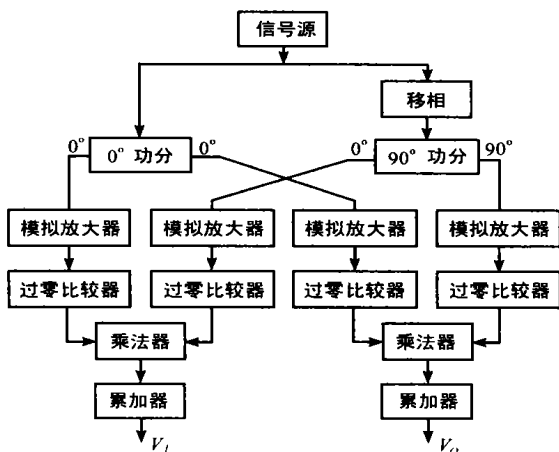


图 3 二阶量化数字相关器实验系统框图

实验系统在 2MHz 频率下工作. 图中的相移网络可以对信号源输出的两路同相信号中的一路产生可变的相位差. 表 1 列出了试验结果. 试验曲线如图 4 所示.

表 1 二阶量化试验数据

输入信号相差(度)	V_I 的归一化输出	V_Q 的归一化输出
0	0.164	0.202
-30.6	0.126	0.229
-45	0.031	0.262
-45.36	0.004	0.356
-66.24	0.033	0.330
-91.08	0.046	0.578
-111.6	0.335	0.730
-150	0.400	0.993
-154.44	0.479	0.908
-179.64	0.537	0.661

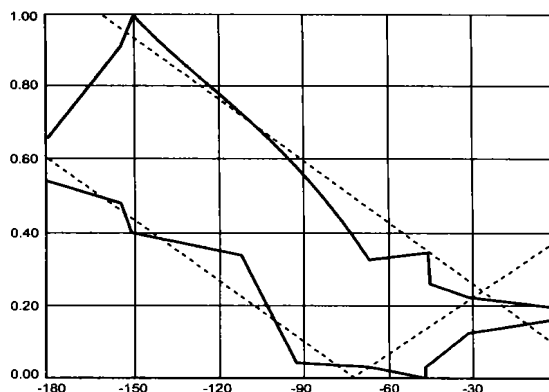


图 4 试验曲线(实线), 理想情况曲线(虚线)

试验结果表明, 对于确定的正弦波信号, 数字相关器的输出与输入信号的相位之间存在着明显的线性相关的关系, 因此完全可以相关器的输出反演得到输入信号的相关性. 这一结果也与本文第二节中分析的二阶量化数字相关器输出 r_2 与模拟相关器输出 r 之间的关系在输出为小信号时的理论相一致.

试验中的主要误差来源可能为功分器. 此外对二阶量化而言, 模拟信号过零点的角度不一定准也是一个误差原因. 此外, 我们对出入信号的相位的测量主要依靠示波器波形的读数, 因此也会带来误差. 然而, 以上的试验主要是为了验证二阶量化相关器的机理. 应该说其结果是可以说明问题的.

5 结论

关于量化阶数确定的问题. 在数字相关器的设计中, 采用多少的量化阶数方案是一个有关数字相关器设计的体制的问题. 本文采用的是二阶量化的方案, 为了进一步提高系统的信噪比, 可以采用三阶或者四阶的量化, 或者不同通道采用不同的量化阶数. 在实际设计中, 应该根据实际应用的指标以及现有的芯片来确定, 以达到在工程上最优的性价比, 同时满足系统关于信噪比的要求. 表 2 给出了不同量化方案和不同采样速率下的 的理论值.

总之,综合孔径微波辐射计是提高传统微波辐射计空间分辨率的有效技术方案。而数字相关技术则是其中的一项关键技术。对数字相关技术的研究可以有效的解决模拟相关器随着天线单元数的增多而迅速增加的问题。这方面机理的研究必将对综合孔径微波辐射计技术的实际研制和应用产生重大的影响。

参考文献:

- [1] John D Isham. High resolution imaging with synthetic aperture microwave radiometry [R]. A Dissertation Proposal ,Electrical and Computer Engineering Department , College of Engineering ,University of Massachusetts ,1996.
- [2] Christopher S Ruf ,Calvin T Swift ,Alan B Tanner ,David M Le Vine . Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth [R]. IEEE Trans. ,1988 ,GRS-26 (5) : 597 - 611 .
- [3] David M Le Vine ,Michael Kao ,Alan B Tanner ,Calvin T Swift ,Andrew Griffis . Initial results and development of a synthetic aperture microwave radiometer [J]. IEEE Trans. ,1990 ,GRS-28(4) :614 - 619 .
- [4] Sander Weinreb . Digital radiometer [A]. Proc. IRE [C] ,1961 ,49(6) : 1099 .

表 2 不同量化阶数的值^[6,7]

量化阶数 Q	Q	
	= 1	= 2
2	0.64	0.74
3	0.81	0.89
4	0.88	0.94

- [5] Calvin T Swift ,David M Le Vine ,Christopher S Ruf . Aperture synthesis concepts in microwave remote sensing of the earth ,IEEE Trans. ,1991 , MTT-39(12) :1931 - 1935 .
- [6] J B Hagen ,D T Earley . Digital-correlation techniques in radio science [J]. Radio Science ,1973 ,8-8 ,9 :775 - 784 .
- [7] L R D Addario ,A R Thompson ,F R Schwab ,J Rranlund . Complex cross correlators with three-level quantization :Design tolerances [J]. Radio Science ,1984 ,19-3 :931 - 945 .
- [8] Brian Laursen . Calibration of a Synthetic Aperture Radiometer [R] , 1996 ,DTU .

作者简介:

王飞鹏 男,1974年1月生于河南郑州,1997年西安交通大学电子工程系毕业,1999年中科院空间中心硕士研究生毕业,现于美国德克萨斯州立大学阿灵顿分校电子工程与计算机科学系攻读博士学位。1997-1999年研究综合孔径辐射计数字相关课题。



吴季 男,1958年4月生于北京,北京邮电大学电磁场与微波技术专业硕士,丹麦技术大学电磁所博士,现为中科院空间中心研究员,主要从事微波遥感机理研究,综合孔径微波辐射计理论与技术研究,土壤湿度测量,电磁场与微波技术等方面的研究工作。