

# Study on Relevant of Correlation Interferometer of Synthetic Aperture Microwave Radiometer

CHEN Shaoyong, PENG Jie, ZHANG Gang, YU Hongmei

Wuhan Ordnance N.C.O Academy of PLA, Wuhan, China

**Abstract:** The problem of relevant of correlation interferometer be abstracted as the narrow-band random signal autocorrelation question. Based on relevant theories, made the certification to its relevance. Derived the limit formula of Relevant of correlation interferometer, and carried on the analysis to this formula, obtains a practical formula and some useful conclusions. Verify The conclusion is Correct, by the experiment. The conclusion is useful to guide the correlation interferometer, the synthetic aperture microwave radiometer and other system's research and the design.

**Keywords:** correlation interferometer; relevant; correlation time; synthetic aperture

## 合成孔径微波辐射计相关干涉仪的相关性研究

陈绍勇, 彭节, 张刚, 余红梅

武汉军械士官学校, 武汉, 中国, 430075

**摘要:** 将相关干涉仪的相关性问题抽象为窄带随机信号的自相关问题。依据相关理论, 对其相关性作了理论推导。导出了相关干涉仪信号相关的极限公式, 并对该公式进行了分析, 得出一个实用公式和一些有用结论。同时通过实验验证了该结论的正确性, 有利于指导相关干涉仪、合成孔径微波辐射计以及其他相关系统的研究和设计。

**关键词:** 相关干涉仪; 相关; 相关时间; 合成孔径

### 1 引言

合成孔径微波辐射计解决了大尺寸真实孔径天线带来的重量和体积问题, 以及扫描成像的困难<sup>[1]</sup>。并在天文观测、地球遥感、精确定位、军事目标探测等方面获得了应用, 体现了巨大的潜力和优势。双天线相关干涉仪是合成孔径微波辐射计的基本单元, 国内目前虽有空间中心和华中科技大学初步研制成功有厘米波段的合成孔径微波辐射计。却少有关于合成孔径微波辐射计相关干涉仪的相关性研究的专业文献, 合成孔径微波辐射计相关干涉仪的相关性研究是设计和评估合成孔径微波辐射计以及开发其他相关微波测量工具的重要基础。根据相关理论, 文中将相关干涉仪的相关性问题抽象为窄带随机信号的自相关问题, 从信号处理的角度对相关干涉仪的相关性, 视场与基线长度的关系等方面做了理论论证和讨论, 并利用自制的 3cm 相关干涉仪做了实验, 验证了系统的相关性与理论推导的正确性, 得出了一些有用的结论。

### 2 相关干涉仪的相关性

相关干涉仪接收的是目标辐射的随机噪声信号, 两路信号经带通滤波器选择和放大器放大到足够的幅度后进行相关处理, 得到一个空间采样值与其他不同间距的相关干涉仪测得的空间采样值一起, 就可反演出目标的亮温分布。要正确反演目标的亮温, 必须保证两路接收的信号具有相关性, 如图 1 所示。

辐射测量原理表明<sup>[2]</sup>:

第一: 热辐射信号  $X(t)$  是均值为零、服从高斯分布、遍历的有色噪声信号。由于  $BPF$  的带宽限制作用, 全频率的热辐射信号  $X(t)$  被天线接收、再经过  $BPF$ , 将变成窄带随机过程  $v(t)$ 。

第二: 来自不同方向的随机信号经过相关干涉仪后是不相关的, 只有来自同一方向的信号经过干涉仪的两个之路后才可能相关, 因此相关干涉仪的相关性指的实际上是同一信号经过不同路径后的相关性问题, 从理论上讲, 如果不同路径的物理特性完全相同,

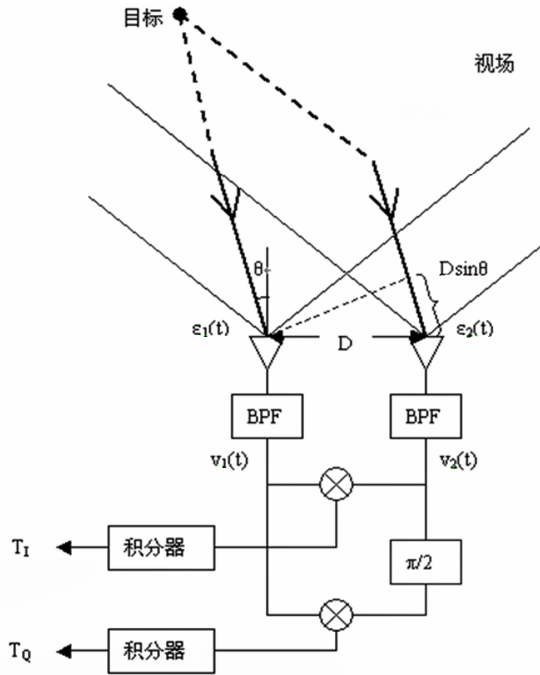


图1. 相关干涉仪原理图

则这两路窄带随机信号在进行相关运算时只存在时延上的差别，如图，目标辐射信号到达相关干涉仪天线口面的时延就是：

$$\Delta t = \frac{D \sin \theta}{c} \quad (1)$$

式中， $D$  是二单元相关干涉仪天线之间的距离， $\theta$  为目标与天线法向的夹角。

因此，相关干涉仪的相关性问题就可定性为：窄带随机信号的自相关问题。下面将以一维相关干涉仪为例讨论该问题。

设  $BPF$  中心频率为  $f_0$ ，带宽  $\Delta f = 2f_c$  ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ ， $\omega_c = 2\pi f_c$ ) 且  $\Delta f \ll f_0$ ，窄带随机过程可以表示成准正弦振荡：

$$v(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$$

它的功率谱表示为：

$$S_v(\omega) = |H_{BPF}(\omega)|^2 \cdot L(\omega) \cdot S_x(\omega) \propto |H_{BPF}(f)|^2 \cdot L(f) \cdot B_f$$

得到它的自相关函数为：

$$R_v(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0 - \omega_c}^{\omega_0 + \omega_c} S_v(\omega) \cos(\omega \tau) d\omega$$

而自相关系数表示随机过程在两个不同时刻的起伏值之间的线性相关程度，窄带随机信号的自相关系

数为[3]：

$$r_v(\tau) = \frac{R_v(\tau) - m_v^2}{R_v(0) - m_v^2} = \frac{R_v(\tau)}{R_v(0)} = \frac{\frac{1}{\pi} \int_{\omega_0 - \omega_c}^{\omega_0 + \omega_c} S_v(\omega) \cos(\omega \tau) d\omega}{\frac{1}{\pi} \int_{\omega_0 - \omega_c}^{\omega_0 + \omega_c} S_v(\omega) d\omega} = \frac{\int_{f_0 - f_c}^{f_0 + f_c} |H_{BPF}(f)|^2 \cdot L(f) \cdot B'_f \cdot \cos(2\pi f \tau) df}{\int_{f_0 - f_c}^{f_0 + f_c} |H_{BPF}(f)|^2 \cdot L(f) \cdot B'_f df}$$

若不考虑信道的大气衰减影响，即  $L(f) = 1$ ； $BPF$  是理想的带通滤波器，增益为  $A$ ，则其幅频特性为：

$$|H_{BPF}(f)| = \begin{cases} A & f_0 - f_c \leq |f| \leq f_0 + f_c \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

当带宽  $2f_c$  远远小于中心频率  $f_0$  时，我们可以认为  $B'_f$  不随频率变化，为常数；则  $v(t)$  的自相关系数表达式可以简化为：

$$r_v(\tau) = \frac{\int_{f_0 - f_c}^{f_0 + f_c} \cos(2\pi f \tau) df}{\int_{f_0 - f_c}^{f_0 + f_c} df} = \frac{\sin(2\pi(f_0 + f_c)\tau) - \sin(2\pi(f_0 - f_c)\tau)}{2\pi \tau \cdot 2f_c} = \frac{\cos 2\pi f_0 \tau \cdot \sin 2\pi f_c \tau}{2\pi f_c \tau}$$

其中低频部分  $\frac{\sin 2\pi f_c \tau}{2\pi f_c \tau}$  为其包络，则相关时间：

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} r_v(\tau) \text{的包络} \cdot d\tau = \int_0^{\infty} \frac{\sin 2\pi f_c \tau}{2\pi f_c \tau} d\tau = \frac{1}{4f_c} \quad (2)$$

由上式看出，相关时间  $\tau_0$  与 2 倍带宽成反比，也就是说滤波器带宽越宽，相关时间越小，相关性越差。

根据式 (1) 和 (2) 可知，由路程差  $D \sin \theta$  造成的延迟  $\Delta t$  至少须满足条件：

$$\Delta t < \tau_0 \text{ 和 } \Delta t + \frac{1}{4f_0} < \tau_0$$

如图所示， $\frac{1}{4f_0}$  是由移相器移相  $\frac{\pi}{2}$  所带来的，将

(1) 式代入  $\Delta t + \frac{1}{4f_0} < \tau_0$  式，可得到  $\theta$  的限制条件：

$$\theta < \arcsin \frac{c(\tau_0 - \frac{1}{4f_0})}{D} = \arcsin \frac{c(\frac{1}{4f_c} - \frac{1}{4f_0})}{D} \quad (3)$$

辐射信号到达天线的入射角  $\theta$  应满足 (3) 式的条件, 才能保持两天线输出信号的相关性。其意义如下:

第一: 辐射计天线之间的距离  $D$  越大, 干涉仪相关性越差, 入射角  $\theta$  就越小, 辐射计的视场也就越小。

第二:  $f_c$  越大, 带宽  $\Delta f = 2f_c$  越宽, 相关性越差, 入射角  $\theta$  就越小, 辐射计的视场也就越小;  $f_0$  越大, 移相产生的延迟就越短, 相关性越好, 入射角  $\theta$  就越大, 辐射计的视场也就越大。

第三: 由于  $f_c$  和  $\frac{1}{4f_0}$  不是一个数量级, 在计算时, 可以将  $\frac{1}{4f_0}$  这一项忽略, (3) 式可进一步简化为:

$$\theta < \arcsin \frac{c \frac{1}{4f_c}}{D} \quad (4)$$

(4) 式可作为设计相关干涉仪视场的实用公式。若取  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $f_c = 10 \text{ MHz}$ , 如果  $D \leq 7.5 \text{ m}$ , (4) 式恒成立, 入射角可以取任意值, 信号总是相关, 对入射角  $\theta$  起限定作用的将是天线主波束宽度; 如果  $D > 7.5 \text{ m}$ , (4) 式在一定条件下成立, 其入射角  $\theta$  范围随辐射计天线间距  $D$  变化曲线如图 2 实线所示。

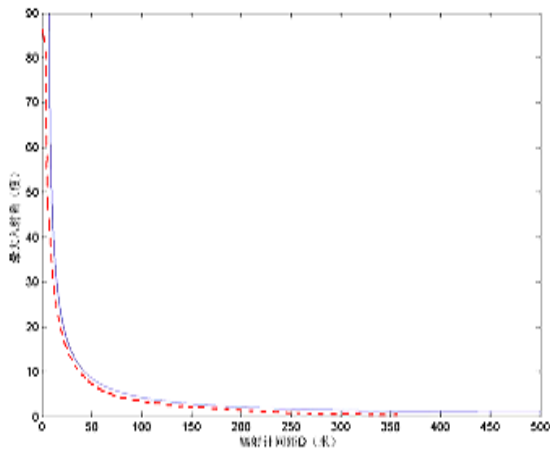


图 2. 目标入射角随天线间距变化曲线

### 3 相关干涉仪的相关性验证

为了验证系统对窄带随机信号相关性的影响, 依据相关干涉仪辐射测量原理, 利用华中科技大学研制的 3 厘米波段的相关干涉仪, 做了相关性试验, 其框图如图 3 所示<sup>[4]</sup>。

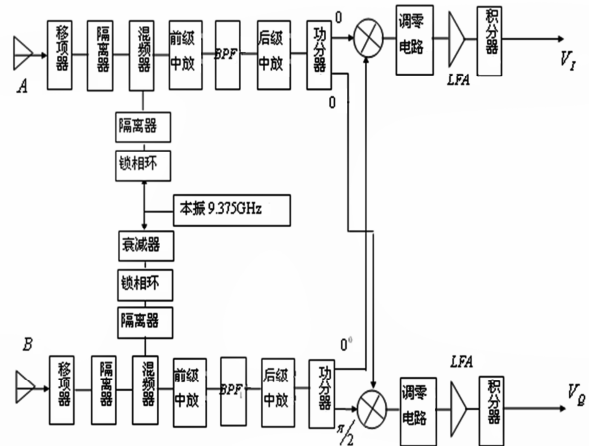


图 3. 3cm 相关干涉仪框图

实验时, 要做好三个准备工作: 1. 要对系统进行调试; 2. 系统定标要精确; 3. 要屏蔽外在干扰, 具体方法见文献[4]。

文献中从测相干条纹的角度验证了其相关性与理论值吻合得较好, 本文主要测试了该系统中  $\theta$  (视场) 的极限范围, 其结果如图 2 种红色虚线所示, 与理论计算结果也非常相近, 但都比理论值略小, 这可能是由于在  $\theta$  的极限值附近, 信号相关性减小, 而系统自身或者外界的噪声相对于相关信号足够大, 以至于淹没了相关信号。不过这些都在可控的范围内, 对系统的性能影响较小。

### References (参考文献)

- [1] Ruf C S, Swift C T, Tanner A B, *et al.* Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the Earth. IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing. 1988, 26(5): 597-611.
- [2] 王绶琯, 吴盛殷等. 射电天文方法. 北京: 科学出版社. 1988.
- [3] 朱华, 黄辉宁, 李永庆, 梅文博. 随机信号分析. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [4] 卢军, 罗晓曙. 厘米波段双天线相关处理接收系统的设计. 广西工学院学报. 1997, 8(2): 67-71.