

文章编号: 1000-6893(2001)S0-0S26-04

# 比相单脉冲雷达测角与角闪烁研究

王祖林<sup>1</sup>, 张 孟<sup>1</sup>, 段世忠<sup>2</sup>, 周荫清<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学 201 教研室, 北京 100083)

(2 北京航空航天大学 203 教研室, 北京 100083)

## RESEARCHING ABOUT ANGLE MEASUREMENT OF PHASE COMPARISON MONOPULSE RADAR AND ANGULAR GLINT

WANG Zu-lin<sup>1</sup>, ZHANG Meng<sup>1</sup>, DUAN Shi-zhong<sup>2</sup>, ZHOU Yin-qing<sup>2</sup>

(1 Faculty 201, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2 Faculty 203, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 比相单脉冲雷达采用和差通道接收信号比相的方法测角。一般认为, 雷达事实上并不是在测量目标的方向, 而是在测量目标的角闪烁方向。从特殊的两点目标出发, 分析了单点目标和复杂目标下比相单脉冲雷达和差通道方式测角的原理与内在异同, 探讨了比相单脉冲雷达测角与角闪烁的关系, 提出有关雷达测角的新的观点。

**关键词:** 角闪烁; 角闪烁线偏差; 比相单脉冲雷达; 复杂目标

**中图分类号:** V 243.2 **文献标识码:** A

**Abstract:** The phase comparison monopulse radar measures angles by comparing the phase of the difference-channel signals with the phase of the sum-channel signal. It has been generally accepted that what the radar measures is not the directions of the target, but angular glint errors. Starting with a special two-point target here, this paper analyzes the principle of means of phase comparison monopulse radar used to measure the angles, discusses the internal relation between angle measurements of phase comparison monopulse radar and angular glints, and puts forward new viewpoints about radar angle measurements.

**Key words:** angular glint; linear glint error; phase comparison monopulse radar; complex target

50 年代, D. D. Howard 等提出角闪烁概念。后来, 通过大量的试验观测, 一般认为: 雷达事实上并不是在测量目标的方向, 而是在测量“目标再辐射场等相面法线”的方向(又称目标的“闪烁点”方向), 而且当接收信号最小时, 这个方向可以与目标的方向大不一样<sup>[1]</sup>。因此, 当目标处于雷达照射空域时, 比相单脉冲雷达测角应得到目标的角闪烁方向。本文的分析表明传统比相单脉冲雷达测角与目标的方向存在偏差, 但不同于角闪烁产生的偏差, 二者之间存在相关性。

### 1 比相单脉冲雷达的测角原理分析

一般, 远场信号到达雷达接收天线时可以近似看作平面波。设分天线分布如图 1 所示, 入射波方位角为  $\phi$  俯仰角为  $\theta$ 。设入射波为单点目标回波, 目标在天线系中的坐标为  $(x, y, z)$ , 距离天线中心  $r_0$ 。

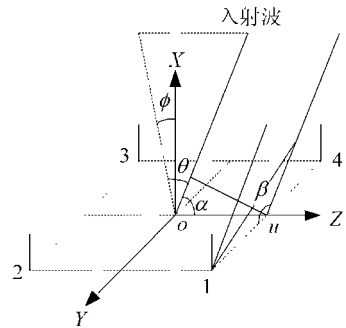


图 1 天线接收信号示意图

Fig 1 Chart of antenna receiving signal

目标处于天线远场, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{z}{r} &= \sin \theta = \cos \alpha \\ \frac{y}{r} &= \cos \theta \sin \phi = \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

令  $a = \frac{z}{r} = \frac{y}{r}$ , 天线中心接收目标回波信号为  $A e^{j\psi}$ , 则和通道、方位差通道及俯仰差通道接收信号分别为

$$\begin{aligned} \Sigma &= 4A e^{j\psi} \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta\right\} \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} a \cos\theta \sin\phi\right\} \\ \Delta_1 &= 4jA e^{j\psi} \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta\right\} \sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda} a \cos\theta \sin\phi\right\} \\ \Delta_2 &= 4jA e^{j\psi} \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} a \cos\theta \sin\phi\right\} \sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

对单点目标, 有  $-j\Delta_1/\Sigma$ ,  $-j\Delta_2/\Sigma$  为实数, 即

$$\begin{cases} |\operatorname{Re}(-j\Delta_1/\Sigma)| = |\Delta_1|/|\Sigma| \\ |\operatorname{Re}(-j\Delta_2/\Sigma)| = |\Delta_2|/|\Sigma| \end{cases} \quad (3)$$

对  $n$  点复杂目标

$$\Sigma = \sum_{i=1}^n \Sigma_i; \Delta_1 = \sum_{i=1}^n \Delta_{1i}; \Delta_2 = \sum_{i=1}^n \Delta_{2i} \quad (4)$$

式中:  $\Sigma_i, \Delta_{1i}, \Delta_{2i}$  为天线接收第  $i$  点回波的和通道、方位差通道、俯仰差通道信号。存在

$$\begin{cases} |\operatorname{Re}(-j\Delta_1/\Sigma)| = |\Delta_1|/|\Sigma| \\ |\operatorname{Re}(-j\Delta_2/\Sigma)| = |\Delta_2|/|\Sigma| \end{cases} \quad (5)$$

可以看出, 对复杂目标而言,  $-j\Delta_1/\Sigma, -j\Delta_2/\Sigma$  为复数。正是这一点成为下面分析复杂目标角闪烁的基础。

## 2 简单两点目标的显著问题

这里, 继续看一个反映传统比相单脉冲雷达测角有别于角闪烁的实例。

设有对等两点目标如图 2 所示, 雷达(观察点)处于两点目标连线的垂直平分线上, 天线系和目标系的坐标系设置如图 2 所示。

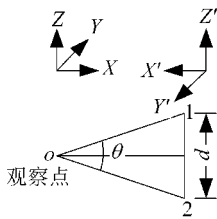


图 2 两点目标的分析

Fig 2 A analysis of two point targets

设  $o$  点接收目标 1 的回波  $A e^{j\psi}$ , 则  $o$  点接收目标 2 的回波可表示为  $A e^{j(\psi+\delta)}$ , 其中  $\delta$  为目标 2 回波相对于目标 1 回波的相位差。

由角闪烁线偏差的计算公式<sup>[2]</sup>, 有

$$e\phi = \begin{cases} 0 & (\delta = m\pi, m \text{ 为奇数}) \\ \delta & (\delta = m\pi, m \text{ 为偶数}) \end{cases}$$

$e\phi, e\theta$  分别为方位向与俯仰向的角闪烁线偏差。由式(2)、式(4)可得

$$\frac{-j\Delta_1}{\Sigma} = 0$$

$$\frac{-j\Delta_2}{\Sigma} = \begin{cases} -j \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \sin\frac{\theta}{2}\right) \tan\frac{\delta}{2} & (\delta = m\pi, m \text{ 为奇数}) \\ 0 & (\delta = m\pi, m \text{ 为偶数}) \end{cases}$$

显然  $|\Delta_2|/|\Sigma|$  随相位差  $\delta$  的变化规律不同于角闪烁线偏差的变化规律。

考察  $-j\Delta_2/\Sigma$  的实部, 有

$$\operatorname{Re}\left(\frac{-j\Delta_2}{\Sigma}\right) = \begin{cases} 0 & (\delta = m\pi, m \text{ 为奇数}) \\ \delta & (\delta = m\pi, m \text{ 为偶数}) \end{cases}$$

$\operatorname{Re}(-j\Delta_2/\Sigma)$  随相位差  $\delta$  的变化规律与角闪烁线偏差的变化规律相同。

## 3 雷达测角与角闪烁的关系

现在讨论一般  $n$  点复杂目标的雷达测角与角闪烁。

以目标坐标系为参考系, 观察点  $o$  处于  $X$  轴上(观察点不处于  $X$  轴时可通过坐标旋转使满足该条件), 如图 3 所示。

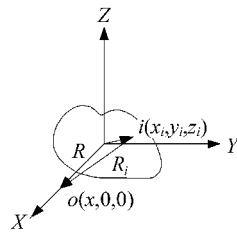


图 3  $n$  点目标模型

Fig 3  $n$  scatter point target model

由角闪烁计算公式<sup>[2]</sup>及各点回波相对相位关系, 有

$$\left. \begin{aligned} e\theta &= \frac{U_N \sum_{i=1}^n (z U_i) + V_N \sum_{i=1}^n (z V_i)}{U_N^2 + V_N^2} \\ e\phi &= \frac{U_N \sum_{i=1}^n (-y U_i) + V_N \sum_{i=1}^n (-y V_i)}{U_N^2 + V_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $U_i = A_i \cos\varphi_i, V_i = A_i \sin\varphi_i, U_N = \sum_{i=1}^n U_i, V_N = \sum_{i=1}^n V_i$ ;  $A_i, \varphi_i$  分别是第  $i$  个散射中心的回波幅度和回波相位。

下面讨论雷达测角问题, 以天线坐标系为参考系, 如图 4 所示, 设第  $i$  点在天线系中的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 方位角及俯仰角分别为  $\phi_i, \theta_i$ 。因雷达天线指向目标, 一般  $\phi_i, \theta_i$  很小, 从而

$$\frac{2\pi}{\lambda} a \cos\theta \sin\phi, \frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta \quad (7)$$

足够小, 由式(1)及  $R_i \approx R$  可近似有

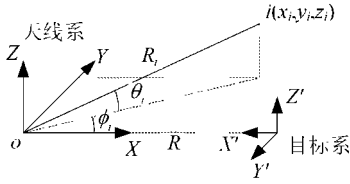


图 4 雷达测角与角闪烁

Fig 4 Radar angle measurement and angular glint

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta\right) & 1 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \cos\theta \sin\phi\right) & 1 \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \cos\theta \sin\phi\right) & \frac{2\pi a}{\lambda R} y_i \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta\right) & \frac{2\pi a}{\lambda R} z_i \end{aligned}$$

由式(2)、式(4)及近似条件有

$$\left. \begin{aligned} e\phi &= \frac{\lambda R}{2\pi a} \operatorname{Re}\left\{\frac{-j\Delta_1}{\Sigma}\right\} = \frac{\sum_{i=1}^n U_N y_i U_i + V_N y_i V_i}{U_N^2 + V_N^2} \\ e\theta &= \frac{\lambda R}{2\pi a} \operatorname{Re}\left\{\frac{-j\Delta_2}{\Sigma}\right\} = \frac{\sum_{i=1}^n U_N z_i U_i + V_N z_i V_i}{U_N^2 + V_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中:  $U_i = A_i \cos\Psi_i$ ;  $V_i = A_i \sin\Psi_i$ ;  $U_N = \sum_{i=1}^n U_i$ ;  $V_N = \sum_{i=1}^n V_i$ .

比较图 3 和图 4 及式(6)、式(8), 考虑到方位角  $\phi$  的正方向相同, 而俯仰角  $\theta$  的正方向相反, 实际有  $e\phi = e\phi$ ,  $e\theta = -e\theta$ .

应该指出, 这种近似性是有条件的: 要求式(7)足够小, 因此要求  $\phi$ ,  $\theta$  很小.

#### 4 仿真结果

图 5、图 6 给出距离 500m, 最大翼展 4.15m 时的 8 点复杂目标模型采用相位梯度法和利用比相单脉冲雷达和差通道方式测角的两种方法的仿真计算结果比较. 图 5 为两种方法的角闪烁计算结果的比较, 图 6 为两种计算方法得出的角闪烁概率密度分布的比较图. 由图可见, 曲线几乎重合, 说明两种方法计算结果基本相同.

#### 5 结论

由上面的推导与分析可以得出结论: 比相单

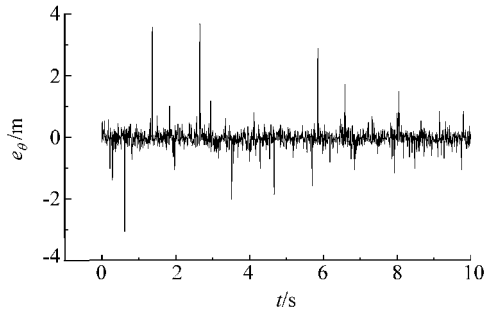


图 5 两种方法计算结果的比较

Fig 5 Result comparison of two methods

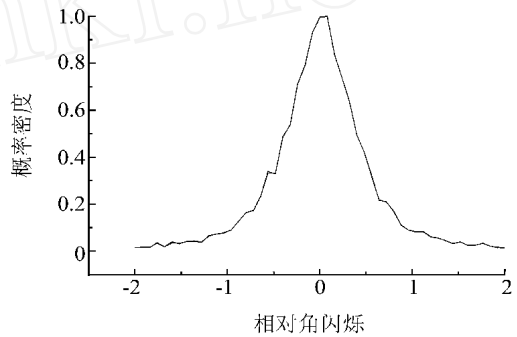


图 6 两种方法得出的概率密度分布图的比较

Fig 6 Comparison of probability density curves resulting from two methods

脉冲雷达测角与角闪烁存在很大的相关性, 这种相关性体现在角闪烁与雷达差、合通道回波比值的实部存在线性关系, 而不是差、和通道的模值比. 假设和通道接收信号  $A e^{j\varphi}$ , 差通道接收信号  $B e^{j\theta}$  ( $\pi/2$  相移后), 则角闪烁线性偏差可采用近似公式

$$e = \frac{B}{A} \cos(\theta - \varphi) \quad (9)$$

计算, 包含了幅度与相位信息, 即瞬时幅度信息. 雷达导引头测角模型应反映式(9)表达的关系. 而雷达实际测角机理取值仅体现幅度信息及相位的超前或滞后关系, 即包络信息. 实际仿真发现, 采用模值比较法计算的角度统计特性不符合  $t$  分布. 这给雷达实际的跟踪过程中角闪烁的抑制方法的研究提出了新的思路, 有较强的理论与实际意义.

#### 参 考 文 献

- [1] [法]卡尔旁第埃 M. 现代雷达基础[M]. 吴明德, 胡朝阳译. 北京: 电子工业出版社, 1987. 278~ 281.
- [2] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993. 144~ 150.

## 作者简介:



王祖林(1965- ),男,湖北潜江人,北京航空航天大学电子工程系副教授,博士,2000年3月毕业于北京航空航天大学通信与信息系统专业,近年来主要从事小波分析应用、SAR 图象处理、雷达系统数字仿真等方面的研究,发表相关论文十多篇。E-mail: wzulin@public east.cn.net



段世忠(1968- ),男,湖南黔阳人,北京航空航天大学电子工程系博士研究生,主要研究领域为信号处理、雷达系统数字仿真、雷达信号环境仿真、系统精确建模等。



张孟(1978- ),男,江西瑞昌人,北京航空航天大学电子工程系硕士研究生,从事雷达系统数字仿真、雷达目标特性、多路径效应等方面的研究。



周荫清(1936- ),男,湖南湘潭人,北京航空航天大学电子工程系教授,博士生导师,中国电子学会会士,1958年毕业于北京航空学院,主要从事星(机)载合成孔径雷达成像处理、高分辨率阵列信号处理、模式识别和电子对抗等领域的研究。