

文章编号: 1001-2486 (2001) 045-0048-06

两点源干扰情况下数据积累点数对雷达测角精度的影响*

吕彤光, 姜文利, 李 盾, 周一宇

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 两点源干扰是干扰被动雷达导引头 (PRS) 的有效手段。但在实际应用中, 两点源的功率不可能完全相等, 这就为 PRS 对抗两点源的干扰提供了契机。通过理论分析和仿真实验证明, 当两点源偏离导引头的电轴方向不大的情况下, 只要保证足够的积累点数, 导引头进行数据积累取均值, 其结果并不指向两源的“重心”或“质心”而是指向两源中功率较大者, 并给出了确定积累点数的解析表达式。

关键词: 雷达测角; 两点源干扰; 被动雷达导引头 (PRS); 诱偏

中图分类号: TJ765.3⁺3 TN959.17 **文献标识码:** A

The Effect of the Number of Radar Accumulating Data on the Accuracy of Angular Measurement with Interference of Dual Sources

LU Tong-guang, JIANG Wen-li, LI Dun, ZHOU Yi-yu

(School Of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Interference of dual sources is an effective means of counteracting passive radar seeker (PRS). In the practice, the power of dual sources is hard to be the same, so it is possible for PRS to counteract interference of dual sources. In far field, PRS will not follow the power centroid and point the higher power source of double sources as long as the number of the seeker accumulating data is large enough. It is proven by theoretical analysis and simulation experiments. And the formulation of the number of the seeker accumulating data is given.

Key words: radar angular measurement; Interference of dual sources; Passive-radar-seeker (PRS); Decoy

对于两点源干扰机理的分析在文献 [1] 中已有报道。文献 [1] 把两点源分为相干和非相干干扰两种, 对于非相干的两点源, 雷达导引头跟踪两点源的功率重心。但这种分析未考虑雷达接收机测向特性、数据积累这两个因素对雷达测角的影响。文献 [2] 通过实验发现: 当两点源发射信号振幅比 $\beta > 1.25$ 时, SY-2G 导引头不再跟踪两源的功率重心, 而是跟踪功率大的那个源。文献 [3]、[4] 指出: 快速 AGC 跟踪系统, 雷达导引头对多个数据积累取均值后不再跟踪两源的功率重心, 而是跟踪功率大的那个源。但上述分析并未说明, 数据积累点数至少应为多大才能保证 PRS 跟踪大功率源。

本文在配备功能强大的 SPW (Signal Processing Worksystem) 软件包的 SUN 工作站上建立了一个比幅比相单脉冲体制的被动导引头模型 (导引头采用 3dB 电桥和限幅器来消除信号振幅调制), 对两点源干扰该导引头做了系统级的仿真实验。通过实验也发现了类似的现象——对于功率不等的两个干扰源, 当它们偏离 PRS 电轴方向不大的情况下, PRS 对多个数据进行积累取均值, 数据积累点数越大, 取得的均值越趋于功率大的那个源。这样就存在一个非常实际的问题, 数据积累点数至少应为多大 (实际应用中积累点数不可能无限大) 时, 才能保证把均值作为大功率源偏离角的估计值具有一定精度并保持一定的置信水平。本文旨在对这个问题进行研究和探讨。

1 比幅比相被动导引头的框图结构

本文用 SPW 中的雷达库、通信库、射频库等提供的功能模块和用 C 代码生成的模块建立了一个合差比幅单脉冲体制的被动导引头模型, 其框图如图 1 所示。框图中的本振、非线性乘法器是雷达库

* 收稿日期: 2001-04-16

基金项目: 国防预研基金资助项目 (2000J7.2.9.KG0114)

作者简介: 吕彤光 (1968-), 男, 博士生。

中的模块，中放是射频库中的模块，RF Hard Limiter 是通信库中的模块，双 T 接头是用加法器和减法器组合成的模块，其它的模块，如带通滤波器、低通滤波器、Hilbert 变换器（90°移相器）等，是 SPW 的标准库提供的模块，角度转换器是用 C 代码生成的模块。

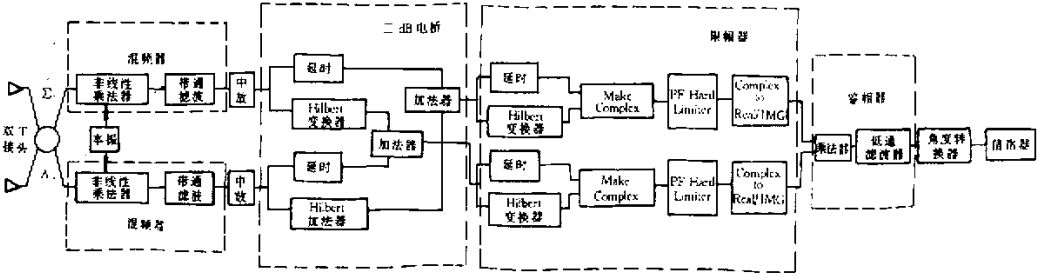


图 1 合差比幅被动导引头的框图结构

Fig.1 Block diagram of the sum-and-difference amplitude-comparison seeker

2 两点源作用下 PRS 产生的偏转电压

利用上述的模型，先推导两点源作用下 PRS 产生的偏转电压。设天线方向图为 $F(\theta)$ ，波束分离角为 θ_0 ，两辐射源的载频相同及脉冲参数相同，且同时工作，两辐射源相对于 PRS 的张角为 $\Delta\theta$ ，两辐射源发射的信号到达 PRS 产生的相差为 φ ($0, 2\pi$) 内均匀分布)，源 1 和源 2 的振幅 u_1, u_2 之比为 β ，两辐射源相对于 PRS 电轴的角度分别为 θ_1, θ_2 。导引头接收的和差信号分别为：

$$U_s = u_1 [F(\theta_1 - \theta_0) + F(\theta_1 + \theta_0)] \cos \omega t + u_2 [F(\theta_2 - \theta_0) + F(\theta_2 + \theta_0)] \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$U_d = u_1 [F(\theta_1 - \theta_0) - F(\theta_1 + \theta_0)] \cos \omega t + u_2 [F(\theta_2 - \theta_0) - F(\theta_2 + \theta_0)] \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

经混频和放大、3dB 电桥、限幅器、鉴相器输出的误差信号为：

$$U_{out}(\theta_1, \theta_2, \beta, \varphi) = K |U|^2 \cos(a_1 - a_2 + \psi_1 - \psi_2) \quad (3)$$

其中

$$a_1 = \arctg \frac{c_1 + d_1 \cos \varphi - d_2 \sin \varphi}{c_2 + d_1 \sin \varphi + d_2 \cos \varphi}, \quad a_2 = \arctg \frac{c_2 + d_2 \cos \varphi - d_1 \sin \varphi}{c_1 + d_1 \cos \varphi + d_2 \sin \varphi} \quad (4)$$

$$c_1 = Ku_1 [F(\theta_1 - \theta_0) + F(\theta_1 + \theta_0)], \quad c_2 = Ku_1 [F(\theta_1 - \theta_0) - F(\theta_1 + \theta_0)] \quad (5)$$

$$d_1 = Ku_2 [F(\theta_2 - \theta_0) + F(\theta_2 + \theta_0)], \quad d_2 = Ku_2 [F(\theta_2 - \theta_0) - F(\theta_2 + \theta_0)] \quad (6)$$

ψ_1 的取值为：

$$\begin{cases} \text{if } (c_1 + d_1 \cos \varphi - d_2 \sin \varphi < 0) \text{ and } (c_2 + d_1 \sin \varphi + d_2 \cos \varphi < 0) \\ \text{if } (c_1 + d_1 \cos \varphi - d_2 \sin \varphi > 0) \text{ and } (c_2 + d_1 \sin \varphi + d_2 \cos \varphi < 0) \\ \text{else } \Rightarrow \psi_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \psi_1 = \pi \quad (7)$$

ψ_2 的取值为：

$$\begin{cases} \text{if } (c_2 + d_2 \cos \varphi - d_1 \sin \varphi < 0) \text{ and } (c_1 + d_1 \cos \varphi + d_2 \sin \varphi < 0) \\ \text{if } (c_1 + d_1 \cos \varphi + d_2 \sin \varphi > 0) \text{ and } (c_2 + d_2 \cos \varphi - d_1 \sin \varphi < 0) \\ \text{else } \Rightarrow \psi_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \psi_2 = \pi \quad (8)$$

K 为中放的放大系数， $|U|$ 为经过限幅器后信号的模，它们都是定值。式 (3) 确定的误差信号就是两点源作用下 PRS 产生的偏转电压。

3 不进行数据积累情况下 PRS 的偏转角度

在不进行数据积累情况下，PRS 的偏转角度将由 $U_{out}(\theta_1, \theta_2, \beta, \varphi) = 0$ 确定，即：

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \pm \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

$$\Rightarrow 1 + \frac{c_1 + d_1 \cos \varphi - d_2 \sin \varphi}{c_2 + d_1 \sin \varphi + d_2 \cos \varphi} \times \frac{c_2 + d_2 \cos \varphi - d_1 \sin \varphi}{c_1 + d_1 \cos \varphi + d_2 \sin \varphi} = 0 \quad (10)$$

$$\Rightarrow c_1 c_2 + d_1 d_2 + (c_2 d_1 + c_1 d_2) \cos \varphi = 0$$

当目标相对于天线电轴偏角不大时, 天线方向图可以近似为

$$F(\theta \pm \theta_0) \approx F(\theta_0) (1 \mp \mu \theta) \quad (11)$$

式中 μ 为常数。令 $\theta' = \theta_1$, $\theta_1 = \theta_2 + \Delta\theta$, $\beta = u_1/u_2$, 把 (5) (6) (11) 式代入 (10) 式得到:

$$u_1^2 \mu \theta_1 + u_2^2 \mu \theta_2 + u_1 u_2 \mu (\theta_1 + \theta_2) \cos \varphi = 0 \quad (12)$$

故由式 (12),

$$\Rightarrow \theta' = \frac{\Delta\theta(1 + \beta \cos \varphi)}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^2} \quad (13)$$

由式 (13) 可进一步得到:

$$\text{当 } \varphi = 0 \text{ 时, } \Rightarrow \theta' = \frac{\Delta\theta}{1 + \beta} \quad (14)$$

$$\text{当 } \beta = 1 \text{ 时, } \Rightarrow \theta' = \frac{\Delta\theta}{2} \quad (15)$$

必须说明式 (13) (14) (15) 的结果是在 $U_{ax}(\theta_1, \theta_2, \beta, \varphi) = 0$ 的情况下得到的, 也就是说, 在 PRS 转动后处于平衡状态下, 源 1 和源 2 相对于 PRS 电轴方向的角度。如果以 PRS 转动前它们的电轴方向为起始点, PRS 的指向角 θ 应表示为: 故由式 (13),

$$\Rightarrow \theta = \frac{-\Delta\theta(1 + \beta \cos \varphi)}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^2} + \theta_1 \quad (16)$$

$$\text{当 } \beta = 1 \text{ 时, } \Rightarrow \theta = \frac{-\Delta\theta}{2} + \theta_1 \quad (17)$$

式 (16) (17) 中的 θ_1 为: PRS 转动前, 源 1 相对于 PRS 电轴方向的角度。

4 进行数据积累取均值情况下 PRS 偏转角度的数学期望值

由式 (16) 可得:

$$\theta(\Delta\theta, \beta, \pi + \varphi) = \frac{-\Delta\theta(1 - \beta \cos \varphi)}{1 - 2\beta \cos \varphi + \beta^2} + \theta_1 \quad (18)$$

$$\theta(\Delta\theta, \beta, \pi - \varphi) = \frac{-\Delta\theta(1 - \beta \cos \varphi)}{1 - 2\beta \cos \varphi + \beta^2} + \theta_1 \quad (19)$$

$$\Rightarrow \theta(\Delta\theta, \beta, \pi + \varphi) = \theta(\Delta\theta, \beta, \pi - \varphi) \quad (20)$$

式 (20) 表示: 在 $\Delta\theta, \beta$ 一定的情况下, θ 以 π 为偶对称。 φ 为均匀分布 $p(\varphi) = \frac{1}{2\pi}$ 的随机变量, 下面求 θ 的数学期望值 $E\{\theta\}$:

$$\beta = 1 \text{ 时, } E\{\theta\} = \int_0^{2\pi} \theta(\varphi) \cdot p(\varphi) \cdot d\varphi = \frac{-\Delta\theta}{2} + \theta_1 \quad (21)$$

$$\beta \neq 1 \text{ 时, } E\{\theta\} = \int_0^{2\pi} \theta \cdot p(\varphi) \cdot d\varphi$$

由式 (20) 可得下式:

$$\begin{aligned}
E\{\theta\} &= \lim_{u \rightarrow \pi} 2 \int_0^u \frac{-\Delta\theta(1 + \beta\cos\varphi)}{1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot d\varphi + \theta_1 \\
&= \frac{-\Delta\theta}{2} - \lim_{u \rightarrow \pi} \frac{\Delta\theta(1 - \beta^2)}{2\pi} \cdot \frac{2}{|1 - \beta^2|} \arctg\left(\sqrt{\frac{1 + \beta^2 - 2\beta}{1 + \beta^2 + 2\beta}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{u}{2}\right)\right) + \theta_1 \\
&= \begin{cases} \theta_1, & \beta > 1 \\ -\Delta\theta + \theta_1 = \theta_2, & \beta < 1 \end{cases} \quad (22)
\end{aligned}$$

式(21)(22)的物理意义是很明显的,在“远场”当目标相对于天线电轴偏角不大时,如果两辐射源功率相等,对多个数据求均值的数学期望值为 $-\Delta\theta/2 + \theta_1$,即PRS指向两源夹角的角平分线。如果两辐射源功率不等,对多个数据求均值的数学期望值为 θ_1 (大功率源),即指向功率大的那个源。

5 积累点数的确定

式(22)揭示了:在“远场”,当目标相对于天线电轴的偏角不大时,进行数据积累取均值($n \rightarrow \infty$)PRS指向大功率的源。但在实际应用中PRS的积累点数 n 不可能为无穷,这样一来就存在一个实际的问题——为保证数据积累取得的均值处于某一区间内具有一定的置信水平,累点数 n 不能小于多少?下面我们来研究这个问题。

考虑 $\beta > 1$ 的情况下, θ 的方差 σ_θ^2 :

$$\begin{aligned}
\sigma_\theta^2 &= 2 \lim_{u \rightarrow \pi} \int_0^u \left[\frac{-\Delta\theta(1 + \beta\cos\varphi)}{1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi} + \theta_1 - \theta_1 \right]^2 \frac{1}{2\pi} d\varphi \\
&= \frac{\Delta\theta^2}{4\pi} \lim_{u \rightarrow \pi} \left[\int_0^u \frac{(1 - \beta^2)^2}{(1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi)^2} d\varphi + 2 \int_0^u \frac{1 - \beta^2}{1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi} d\varphi + u \right] \quad (23)
\end{aligned}$$

①

$$\lim_{u \rightarrow \pi} \int_0^u \frac{(1 - \beta^2)^2}{(1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi)^2} d\varphi = (1 - \beta^2)^2 \lim_{u \rightarrow \pi} \int_0^u \frac{d\varphi}{(1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi)^2} \quad (24)$$

令: $a = 1 + \beta^2$, $b = 2\beta$

$$\lim_{u \rightarrow \pi} \int_0^u \frac{(1 - \beta^2)^2}{(1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi)^2} d\varphi = \frac{(1 - \beta^2)^2 \cdot \pi \cdot a}{(a^2 - b^2)\sqrt{a^2 - b^2}} \quad (25)$$

②

$$\begin{aligned}
&\lim_{u \rightarrow \pi} 2 \int_0^u \frac{1 - \beta^2}{1 + \beta^2 + 2\beta\cos\varphi} d\varphi \\
&= \lim_{u \rightarrow \pi} \frac{4(1 - \beta^2)}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 - 4\beta^2}} \arctg\left(\sqrt{\frac{1 + \beta^2 - 2\beta}{1 + \beta^2 + 2\beta}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{u}{2}\right)\right) \\
&= 4 \frac{1 - \beta^2}{\beta^2 - 1} \times \frac{\pi}{2} = -2\pi \quad (26)
\end{aligned}$$

由①、②得出:

$$\begin{aligned}
\sigma_\theta^2 &= \frac{\Delta\theta^2}{4\pi} \left[\frac{\pi \cdot a \cdot (1 - \beta^2)^2}{(a^2 - b^2)\sqrt{a^2 - b^2}} - 2\pi + \pi \right] \\
&= \frac{\Delta\theta^2}{2(\beta^2 - 1)} \quad (27)
\end{aligned}$$

下面求有限数据积累后的方差,考虑到每次测得的数据 $\theta(i)$ 之间是相互独立的, n 次积累后的 $\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta(i)$ 的方差可由下式确定

$$\sigma_{\bar{\theta}}^2 = \frac{\Delta\theta^2}{2n(\beta^2 - 1)} \quad (28)$$

$$\sigma_{\bar{\theta}} = \Delta\theta / \sqrt{2n(\beta^2 - 1)} \quad (29)$$

由式(29)可以确定数据积累 n 点后其均值的根方差。由式(29)可知,在 $\Delta\theta$ (或 $\Delta\theta$ 变化很微小) β 值一定的情况下,数据积累点数 n 越小,进行数据积累取得的均值的方差越大。根据中心极限定理可得出如下结论:在“远场”、两点源相对于天线电轴的偏角不大时,导引头进行数据积累取得的均值,其分布在大样本下近似为 $N(\theta_1, \Delta\theta^2/2n(\beta^2 - 1))$ 的正态分布 (θ_1 为大功率源相对于未转动前的 PRS 电轴方向的夹角)。这一结论为确定数据积累点数提供了依据,所确定数据积累点数 n 必须能够使得数据积累取得的均值处于某一区间内具有一定的置信水平。

下面求在 $\Delta\theta$ (或 $\Delta\theta$ 变化很微小) β 值一定的情况下,为使数据积累取得的均值 $\bar{\theta}$ 处于 $[\theta_1 - \Delta, \theta_1 + \Delta]$ 区间内具有置信度为 $1 - \alpha$, 积累点数 n 至少为多大?

$$P(\theta_1 - \Delta \leq \bar{\theta} \leq \theta_1 + \Delta) = 1 - \alpha \quad (30)$$

由上式可得:

$$P\left(\frac{-\Delta}{\Delta\theta/\sqrt{2n(\beta^2 - 1)}} \leq \frac{\bar{\theta} - \theta_1}{\Delta\theta/\sqrt{2n(\beta^2 - 1)}} \leq \frac{\Delta}{\Delta\theta/\sqrt{2n(\beta^2 - 1)}}\right) = 1 - \alpha \quad (31)$$

这里 $\frac{\bar{\theta} - \theta_1}{\Delta\theta/\sqrt{2n(\beta^2 - 1)}} \sim N(0, 1)$ 分布,为保证一定的置信度 $1 - \alpha$, 在 Δ 、 $\Delta\theta$ 、 β 一定的情况下,积累点数 n 应满足下式:

$$\frac{\Delta}{\Delta\theta/\sqrt{2n(\beta^2 - 1)}} = u_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad (32)$$

其中, $u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 为 $N(0, 1)$ 的 $1 - \frac{\alpha}{2}$ 的分位数,由式(32)可得下式:

$$n = \left[\left(\frac{\Delta\theta \cdot u_{1-\frac{\alpha}{2}}}{\Delta} \right)^2 / (2(\beta^2 - 1)) \right] + 1 \quad (33)$$

由式(33)确定的 n 值,即在 $\Delta\theta$ (或 $\Delta\theta$ 变化很微小) β 值一定的情况下,为使数据积累取得的均值 $\bar{\theta}$ 处于 $[\theta_1 - \Delta, \theta_1 + \Delta]$ 区间内具有置信度为 $1 - \alpha$, 积累点数 n 至少应满足的值。

6 仿真分析

SPW 提供了先进的计算机辅助工程设计工具及完整的 DSP 模块库。用这些工具能建立任何类型的 DSP 系统并产生设计的硬件描述。工程师负责用方框图的形式输入系统的正确描述以进行仿真,并设置参数值。SPW 产生仿真程序、执行仿真程序和显示仿真结果。SPW 可完成所有的现场记录任务,便于用户找到错误的地方、分析仿真结果和进行分步设计。SPW 的雷达库、通信库、射频库中提供的功能模块与实际器件的性能非常吻合,如雷达库中的本振模块能够模拟频率偏移、调幅和调频噪声、混频器模块对于大功率信号饱和和失真等。这就能够模拟我们所设计的一个系统在实际应用中的应用情况,可以说 SPW 拉近了理论设计到工程应用之间的距离。

为验证上面得到的结论——在“远场”、两点源相对于天线电轴偏角不大时,导引头进行数据积累取得的均值,其分布在大样本下近似为 $N(\theta_1, \Delta\theta^2/2n(\beta^2 - 1))$ 的正态分布 (θ_1 为大功率源相对于未转动前的 PRS 电轴方向的夹角),利用图 1 所示导引头模型在 SPW 环境下进行仿真实验。

仿真条件:设置两点源,两源相对于 PRS 电轴方向的夹角为 $\theta_1 = -2^\circ$ (大功率源), $\theta_2 = 1^\circ$, $\Delta\theta = 3^\circ$, 振幅比 $\beta = 1.2$, 两辐射源发射的信号到达 PRS 产生的相差为 φ ($(0, 2\pi)$ 内均匀分布),导引头天线的波束宽度为 52° , 波束分离角度 θ_0 为 26° , 积累点数为 $n = 30$, 进行 500 次重复实验。

仿真结果:图 2 为 PRS 进行数据积累取均值后偏转角的“直方图”,从图中可以看出;直方图的分布近似以 $\theta_1 = -2^\circ$ (大功率源) 对称分布。在图 3 中,“仿真结果”为 PRS 进行数据积累取均值后偏转角的“经验分布函数”曲线,“理论值”为 $N(\theta_1, \Delta\theta^2/2n(\beta^2 - 1))$ 的正态分布的分布函数曲线 ($\theta_1 = -2^\circ, \theta_2 = 1^\circ, \Delta\theta = 3^\circ, \beta = 1.2, n = 30$),从图中可以看出:仿真结果与理论值非常吻合。

通过仿真实验进一步证明了前面的结论——在“远场”、两点源相对于天线电轴偏角不大时,导

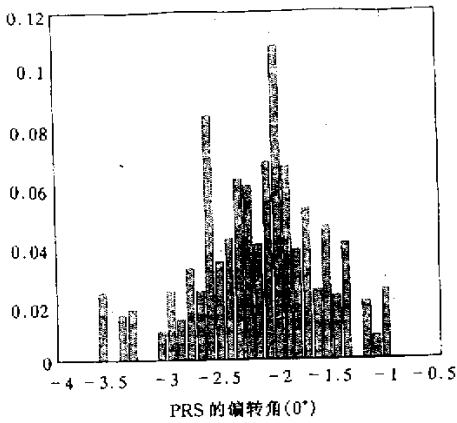


图2 PRS 进行数据积累取均值后偏转角度的直方图

Fig.2 Histogram of the average value of the seeker angle measurement

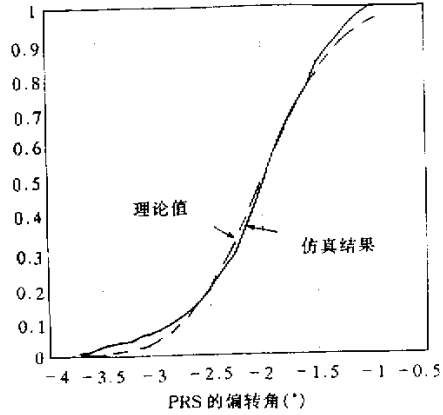


图3 PRS 进行数据积累取均值后偏转角度的经验分布函数曲线图

Fig.3 Distribution function of the average value of the seeker angle measurement

引头进行数据积累取得的均值，其分布在大样本下近似为 $N(\theta_1, \Delta\theta^2/2n(\beta^2 - 1))$ 的正态分布。

7 结束语

对于比幅比相单脉冲体制的被动导引头（导引头采用 3db 电桥和限幅器来消除信号振幅调制），本文通过数学推导和仿真实验得出了如下结果和结论：

① 在“远场”跟踪状态下（两点源偏离导引头的电轴方向不大的情况下），PRS 对多个数据进行积累取均值的数学期望值（积累点数 $n \rightarrow \infty$ ）就是大功率源偏离 PRS 电轴方向的角度。

② 在“远场”跟踪状态下，若 $\Delta\theta$ （两点源与 PRS 形成的夹角）、 θ_1 （PRS 转动前，两点源中大功率源与 PRS 电轴方向形成的夹角）、 β （两点源发射信号振幅的比值），则进行数据积累取均值后（积累点数 n 为有限值），PRS 的偏转角度符合 $N(\theta_1, \Delta\theta^2/2n(\beta^2 - 1))$ 的正态分布。这就为确定数据积累点数提供了依据，所确定数据积累点数 n 必须能够使得数据积累取得的均值处于某一区间内具有一定的置信水平。

③ 在“远场”跟踪状态下，若 $\Delta\theta$ （或 $\Delta\beta$ 变化很微小）、 β 值一定，为使数据积累取得的均值 $\bar{\theta}$ 处于 $[\theta_1 - \Delta, \theta_1 + \Delta]$ 区间内具有置信度为 $1 - \alpha$ ，积累点数至少应满足式 (33) 确定的值。

因此可以得出结论：在“远场”跟踪状态下（两点源偏离导引头的电轴方向不是很大的情况下），对于功率不等的两个干扰源，只要保证足够的积累点数，导引头进行数据积累取均值，其结果并不指向两源的“重心”或“质心”而是指向两源中功率较大者。

参考文献：

- [1] [苏] C.A. 瓦金, П.Н 舒斯托夫著. 无线电干扰和无线电技术侦察基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [2] 司锡才, 查玉峰. 两点源抗反辐射导弹诱偏技术 [J]. 航空学报, 1989 (6).
- [3] Dunlop A.J. AGC Response and Target Glint. 自动增益控制响应和目标闪烁 [J]. 现代雷达, 1986, (5).
- [4] L. V. McWhorter. Response of various monopulse seeker to a multi-source environment [A]. South East Con '81: 698-709
- [5] D. C. Schleher. Low probability of intercept radar [J]. IEEE, International Radar Conference. 1983: 346-349.

