

## 多个斯威林 4 型目标输出信号近似服从高斯分布研究

李朝伟 王宏强 黎湘 庄钊文

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 国防重点实验室 长沙 410073)

**摘要** 为了将对瑞利目标的检测与分辨方法应用于多个斯威林 4 型目标的检测与分辨, 该文主要研究了多个斯威林 4 型目标存在时输出信号近似为高斯分布的条件。首先推导了多个斯威林 4 型目标存在时雷达接收机输出信号的概率分布; 在此基础上, 通过仿真获得了输出信号近似为高斯分布的条件, 即多个目标中回波功率最大的两个目标的信噪比相差不大于 7dB。

**关键词** 目标检测与分辨, 斯威林 4 型目标, 高斯分布

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2006)02-0330-05

## Study on the Approximate Gaussian Distribution of the Outputs for Multiple Swerling 4 Targets

Li Chao-wei Wang Hong-qiang Li Xiang Zhuang Zhao-wen

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The condition under which the output signals of monopulse radar receiver with two Swerling 4 targets are approximate to the Gaussian distribution has been studied in order to apply the detection and estimation methods of Rayleigh targets to Swerling 4 targets. First, the probability density function(pdf) of the outputs under multiple Swerling targets are derived; then get the condition, under which the pdf of the outputs is approximate to Gaussian distribution, that the difference between the SNRs of two targets, whose return's power are the biggest among the targets, is not more than 7 dB.

**Key words** Target detection and discrimination, Swerling 4 target, Gauss distribution

### 1 引言

斯威林模型是目标 RCS 起伏的统计分布的 5 种标准统计模型, 已经被证明广泛适用于雷达目标幅度变化的情况。通常, 非起伏目标称做斯威林 0 型, 起伏目标分别称为斯威林 1, 2, 3 及 4 型, 具体定义可参见文献[1]。这里主要研究起伏目标情况下单脉冲雷达对多个目标的检测及估计问题。

现有文献<sup>[2-5]</sup>主要对斯威林 1, 2 型目标进行了检测及估计方面的研究, 而对于斯威林 3, 4 型目标却很少涉及。主要原因是多个斯威林 3, 4 型目标作用下接收机输出信号并不服从高斯分布, 而是具有复杂的概率分布, 从而导致相关的检测及估计理论难于建立。

作为理论研究, 本文对多个斯威林 3, 4 型目标的检测和分辨方法进行了初步探讨。主要是研究多个斯威林 3, 4 型目标作用下输出信号近似服从高斯分布的条件, 从而在近似服从高斯分布的条件下, 可采用现有文献针对输出信号服

从高斯分布时所提出的方法来检测与分辨多个斯威林 3, 4 型目标。由于斯威林 3, 4 型目标具有相同的概率分布, 故本文仅研究斯威林 4 型目标。

### 2 多个斯威林 4 型目标时输出信号的概率分布

为研究多个斯威林 4 型目标作用下, 接收机输出信号近似服从高斯分布的条件, 本节首先推导了接收机输出信号的概率分布。

#### 2.1 输出信号模型

当  $N$  个斯威林 4 型目标存在单脉冲雷达波束内时, 若记

$$x_i = \alpha_i \cos \phi_i, y_i = \alpha_i \sin \phi_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中  $\alpha_i$ ,  $\phi_i$  分别为第  $i$  个目标的幅度及相位, 则雷达接收机和、差通道中同相及正交支路的输出信号为(这里只取了方位差通道)

$$S_I = x_1 + \dots + x_N + n_{S_I} \quad (2)$$

$$S_Q = y_1 + \dots + y_N + n_{S_Q} \quad (3)$$

$$D_I = x_1 \eta_1 + \dots + x_N \eta_N + n_{D_I} \quad (4)$$

$$D_Q = x_1 \eta_1 + \dots + x_N \eta_N + n_{D_Q} \quad (5)$$

式中  $n_{S_1}, n_{S_0}, n_{D_1}, n_{D_0}$ , 分别为同相及正交信号中的噪声, 且满足以下关系

$$\left. \begin{aligned} n_{S_1} &\sim N(0, \delta_s^2), & n_{S_0} &\sim N(0, \delta_s^2) \\ n_{D_1} &\sim N(0, \delta_d^2), & n_{D_0} &\sim N(0, \delta_d^2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} E(n_{S_1} n_{S_0}) &= E(n_{D_1} n_{D_0}) = 0 \\ E(n_{S_1} n_{D_1}) &= E(n_{S_0} n_{D_0}) = \rho \delta_s \delta_d \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

### 2.2 信号 $x_i, y_i$ 的概率分布

假定第  $i$  个目标的回波幅度  $\alpha_i$  的概率密度为<sup>[4]</sup>

$$p(\alpha_i) = \frac{8\alpha_i^3}{\alpha_{0i}^4} \exp\left(-\frac{2\alpha_i^2}{\alpha_{0i}^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中  $\alpha_{0i}^2 = E[\alpha_i^2]$ , 回波相位  $\phi_i$  在  $(-\pi, \pi)$  之间均匀分布。

因为  $\alpha_i$  与  $\phi_i$  相互独立, 故

$$f(\alpha_i, \phi_i) = \frac{1}{2\pi} \frac{8\alpha_i^3}{\alpha_{0i}^4} \exp\left(-\frac{2\alpha_i^2}{\alpha_{0i}^2}\right) \quad (9)$$

记  $\phi = \phi_i$ , 并根据式(1), 由变量转换易得

$$f(x_i, \phi) = \frac{1}{2\pi} \frac{8x_i^3}{\alpha_{0i}^4 \cos^4 \phi} \exp\left(-\frac{2x_i^2}{\alpha_{0i}^2 \cos^2 \phi}\right) \quad (10)$$

对式(10)中的  $\phi$  在  $(-\pi, \pi)$  间进行积分可得

$$f(x_i) = \frac{4}{\sqrt{2\pi}\alpha_{0i}^3} \left(x_i^2 + \frac{\alpha_{0i}^2}{4}\right) \exp\left(-\frac{2x_i^2}{\alpha_{0i}^2}\right) \quad (11)$$

同理, 可得

$$f(y_i) = \frac{4}{\sqrt{2\pi}\alpha_{0i}^3} \left(y_i^2 + \frac{\alpha_{0i}^2}{4}\right) \exp\left(-\frac{2y_i^2}{\alpha_{0i}^2}\right) \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可推知  $x_i, y_i$  都是均值为零, 方差为  $\alpha_{0i}^2/2$  的随机变量。

### 2.3 两个斯威林4型目标时输出信号的概率分布

根据上面推出的  $x_i, y_i$  的概率分, 可进一步对  $S_1, S_0, D_1$  及  $D_0$  等输出信号的概率分布进行推导。因为这几个信号的推导都相似, 故下面只给出信号  $S_1$  概率分布的推导。

设  $x_1$  的特征函数为  $\varphi_1(t)$ ,  $x_2$  的特征函数为  $\varphi_2(t)$ ,  $n_{S_1}$  的特征函数为  $\varphi_s(t)$ 。因为  $x_1, x_2$  及  $n_{S_1}$  相互独立, 所以  $S_1$  的特征函数为<sup>[6]</sup>

$$\varphi(t) = \varphi_1(t)\varphi_2(t)\varphi_s(t) \quad (13)$$

根据特征函数的定义:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1) \exp(jtx_1) dx_1 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{4}{\sqrt{2\pi}\alpha_{01}^3} \left(x_1^2 + \frac{\alpha_{01}^2}{4}\right) \exp\left(-\frac{2x_1^2}{\alpha_{01}^2} + jtx_1\right) dx_1 \\ &= \left(1 - \frac{\alpha_{01}^2 t^2}{8}\right) \exp\left(-\frac{\alpha_{01}^2 t^2}{8}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

同理, 可得

$$\varphi_2(t) = \left(1 - \frac{\alpha_{02}^2 t^2}{8}\right) \exp\left(-\frac{\alpha_{02}^2 t^2}{8}\right), \quad \varphi_s(t) = \exp\left(-\frac{\delta_s^2 t^2}{2}\right) \quad (15)$$

由式(14)、式(15)得

$$\varphi(t) = \left(1 - \frac{\alpha_{01}^2 t^2}{8}\right) \left(1 - \frac{\alpha_{02}^2 t^2}{8}\right) \exp\left(-\frac{\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2}{8} t^2\right) \quad (16)$$

根据式(16)及特征函数的反演公式<sup>[6]</sup>可求得  $S_1$  的概率密度

$$\begin{aligned} f(S_1) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \exp(-jtS_1) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \frac{\alpha_{01}^2 t^2}{8}\right) \left(1 - \frac{\alpha_{02}^2 t^2}{8}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2}{8} t^2 - jtS_1\right) dt \\ &= \frac{8f(\alpha_{01}, \alpha_{02}, S_1)}{\sqrt{2\pi(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2)}} \exp\left(-\frac{2S_1^2}{\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} f(\alpha_{01}, \alpha_{02}, S_1) &= \frac{\alpha_{01}^2 \alpha_{02}^2}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2)^4} S_1^4 - \frac{3}{2} \frac{\alpha_{01}^2 \alpha_{02}^2}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2)^3} S_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2)}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2)^2} S_1^2 + \frac{3}{16} \frac{\alpha_{01}^2 \alpha_{02}^2}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2)^2} \\ &\quad - \frac{1}{8} \frac{\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 4\delta_s^2)} + \frac{1}{4} \end{aligned} \quad (18)$$

文献[4]所给出的  $S_1$  概率密度表达式(见文献<sup>[4]</sup>中的式(62)及式(63))比较烦琐, 而且还存在一处错误即原文献式(63)中第5项的分母应为  $(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 4\delta_s^2)$  而不是  $(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)4\delta_s^2$ 。经过类似的推导, 可得到其它几个信号的概率分布, 并具有以下特点:  $S_0$  具有与  $S_1$  相同的概率密度函数; 将  $S_1$  中的  $\alpha_{01}^2, \alpha_{02}^2$  及  $\delta_s^2$  分别替换成  $\eta_1^2 \alpha_{01}^2, \eta_2^2 \alpha_{02}^2$  及  $\delta_d^2$  便可得到  $D_1, D_0$  的概率密度函数。

### 2.4 多个斯威林4型目标时输出信号的概率分布

式(17)是两个斯威林4型目标作用下输出信号  $S_1$  的概率分布。对于多个斯威林4型目标的情况, 仍可按上面求取特征函数的方法推导出, 不过输出信号的概率表达式会相当复杂。按照上面求取输出信号概率分布的方法, 推导出了3个目标时  $S_1$  的概率分布(具体推导略):

$$\begin{aligned} f_1(S_1) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \exp(-jtS_1) dt \\ &= \frac{2f(\alpha_{01}, \alpha_{02}, \alpha_{03}, S_1)}{\sqrt{2\pi(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)}} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{2S_1^2}{\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

式中

$$f = \frac{8\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2\alpha_{03}^2S_1^6}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^6} + \left[ \frac{4(\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2 + \alpha_{01}^2\alpha_{03}^2 + \alpha_{02}^2\alpha_{03}^2)}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^4} - \frac{30(\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2\alpha_{03}^2)}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^5} \right] S_1^4 + \left[ \frac{2(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2)}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^2} + \frac{45(\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2\alpha_{03}^2)}{2(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^4} - \frac{6(\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2 + \alpha_{01}^2\alpha_{03}^2 + \alpha_{02}^2\alpha_{03}^2)}{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^3} \right] S_1^2 + \frac{3(\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2 + \alpha_{01}^2\alpha_{03}^2 + \alpha_{02}^2\alpha_{03}^2)}{4(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^2} - \frac{15(\alpha_{01}^2\alpha_{02}^2\alpha_{03}^2)}{8(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)^3} + \frac{(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2)}{2(\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + \alpha_{03}^2 + 4\delta_s^2)} + 1$$

另外, 针对  $N$  个回波功率相等的目标情况, 下面也给出了  $S_1$  的概率分布(具体推导省略):

$$f(S_1) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(N\alpha_{01}^2 + 4\delta_s^2)}} \exp\left(-\frac{2S_1^2}{N\alpha_{01}^2 + 4\delta_s^2}\right) \cdot \left[ \sum_{i=0}^N C_N^i \left(-\frac{\alpha_{01}^2}{8}\right)^{N-i} \int_{-\infty}^{\infty} t^{2(N-i)} p(t) dt \right] = \frac{2}{\sqrt{2\pi(N\alpha_{01}^2 + 4\delta_s^2)}} \exp\left(-\frac{2S_1^2}{N\alpha_{01}^2 + 4\delta_s^2}\right) \cdot \left[ \sum_{i=0}^N C_N^i \left(-\frac{\alpha_{01}^2}{8}\right)^{N-i} V_{2(N-i)} \right] \quad (20)$$

式中

$$V_{2(N-i)} = \sum_{k=0}^{2(N-i)} C_{2(N-i)}^k m^k \mu_{2(N-i)-k} \quad (21)$$

$$\mu_n = \delta^n (n-1)(n-3)\dots 1, \quad n \geq 2 \quad (22)$$

$$m = \frac{-4jS_1}{N\alpha_{01}^2 + 4\delta_s^2}, \quad \delta^2 = \frac{4}{N\alpha_{01}^2 + 4\delta_s^2} \quad (23)$$

多个斯威林 4 型目标情况下其它几个信号的概率分布与两个目标时的结论相同。

### 3 输出信号近似服从高斯分布的条件

针对多个斯威林 4 型目标的情况, 上面推导了输出信号的概率分布。在此基础上, 下面研究输出信号的概率分布表达式近似为高斯分布的条件。

#### 3.1 两个斯威林 4 型目标情况

因为  $x_i, y_i$  都是均值为零, 方差为  $\alpha_{0i}^2/2$  的随机变量, 所以  $S_1$  的均值和方差为

$$E(S_1) = 0, \quad D(S_1) = E(S_1^2) - [E(S_1)]^2 = \frac{\alpha_{01}^2 + \alpha_{02}^2 + 2\delta_s^2}{2} \quad (24)$$

记

$$R_1 = \frac{E[\alpha_1^2]}{2\delta_s^2} = \frac{\alpha_{01}^2}{2\delta_s^2}, \quad R_2 = \frac{E[\alpha_2^2]}{2\delta_s^2} = \frac{\alpha_{02}^2}{2\delta_s^2}, \quad \text{SIR} = \frac{\alpha_{01}^2}{\alpha_{02}^2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (25)$$

分别为两目标的信噪比及功率比。

故可假定  $S_1$  近似服从以下高斯分布, 即

$$f_g(S_1) = \frac{1}{\delta_s \sqrt{2\pi(R_1 + R_2 + 1)}} \exp\left(-\frac{S_1^2}{2\delta_s^2(R_1 + R_2 + 1)}\right) \quad (26)$$

严格来讲, 输出信号  $S_1$  近似为高斯分布式(26)的条件需要直接通过理论推导来获得, 但这很困难。因此, 本文采用仿真的方法来获得式(17)近似为高斯分布的条件, 计算仿真中选取  $\delta_s^2 = 1$ , 其中 SNR 代表  $R_2$ 。图 1~图 3 分别是在信噪比、SIR 变化时得到输出信号  $S_1$  的概率分布及对应的高斯分布曲线, 其中图 2(a)、图 3(a)所示结果与文献[4]中的图 2 和图 4 很相近。由仿真结果可看出: (1) SIR 值对  $S_1$  的概率分布有影响。当 SIR 等于 1 即两目标功率相等时,  $f(S_1)$  与高斯分布  $f_g(S_1)$  的近似程度很好; 而当 SIR=0.1 或 SIR=10 时, 两者近似程度变差,  $f(S_1)$  若采用  $f_g(S_1)$  来近似已不太合理; (2) 信噪比对  $S_1$  概率分布有影响。由图 1~4 可看出, 当 SIR 时, 不论 SNR 为 30dB 还是 4dB,  $f(S_1)$  与高斯分布  $f_g(S_1)$  都非常接近; 当 SIR=10 时, 结果表明  $f(S_1)$  不能用  $f_g(S_1)$  进行合理的近似; 而当 SIR=0.1 时, 近似为  $f_g(S_1)$  也不太合理。

通过大量仿真(限于篇幅, 只给出了上述几组结果)可得出  $f(S_1)$  近似为  $f_g(S_1)$  的条件: 只要两目标的信噪比相差不大于 7dB(即 SIR 在 0.2~5 范围内取值),  $f(S_1)$  与高斯分布  $f_g(S_1)$  就具有合理的近似, 尤其是两目标功率相等 (SIR = 1) 时近似程度最好。这个近似条件与 Sinha 在文献[4]中给出的结论稍有不

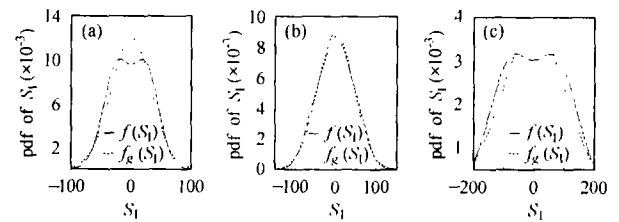


图 1 SIR 变化时  $f(S_1)$  和  $f_g(S_1)$  的仿真曲线(SNR=30dB)

(a)SNR=30dB SIR=0.1 (b) SNR=30dB SIR=1

(c) SNR=30dB SIR=10

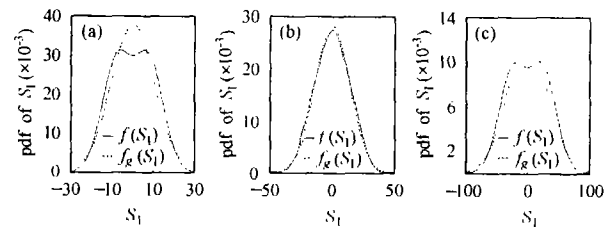


图 2 SIR 变化时  $f(S_1)$  和  $f_g(S_1)$  的仿真曲线(SNR=20dB)

(a)SNR=20dB SIR=0.1 (b) SNR=20dB SIR=1

(c) SNR=20dB SIR=10

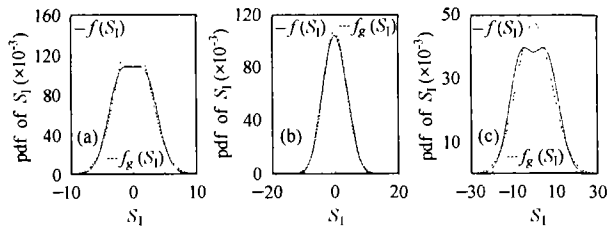


图3 SIR变化时 $f(S_1)$ 和 $f_g(S_1)$ 的仿真曲线(SNR=8dB)

(a)SNR=8dB SIR=0.1 (b) SNR=8dB SIR=1  
(c) SNR=8dB SIR=10

同,他认为,当目标具有低信噪比或SIR较低时(文献没有给出具体的量化条件), $S_1$ 才近似服从零均值的高斯分布。

### 3.2 多个斯威林4型目标情况

上面能够得到两个斯威林4型目标情况下输出信号近似服从高斯分布的条件,那么对多个斯威林4型目标的情况是否也适合呢?

根据概率论的中心极限定理可知<sup>[6]</sup>,当 $n$ 很大时, $n$ 个独立同分布的变量的和将趋于正态分布。当雷达波束内存在的 $n$ 个斯威林4型目标的回波功率相等时,这时输出信号 $S_1, S_Q, D_1$ 及 $D_Q$ 都分别相当于 $n$ 个独立同分布变量的和,因此都可近似为高斯分布,进而它们的联合概率密度可近似为均值为零的高斯分布。

下面研究各目标功率不相等时,输出信号 $S_1, S_Q, D_1$ 及 $D_Q$ 近似为高斯分布的条件。为此,下面对3个目标情况进行了研究。同样,可知3个目标情况下, $S_1$ 的均值和方差为

$$E(S_1)=0, D(S_1)=E(S_1^2)-[E(S_1)]^2=\frac{\alpha_{01}^2+\alpha_{02}^2+\alpha_{03}^2+2\delta_1^2}{2} \quad (27)$$

因而可假定 $S_1$ 要近似的高斯分布为

$$f_{g1}(S_1)=\frac{1}{\delta_s\sqrt{2\pi(R_1+R_2+R_3+1)}}\cdot\exp\left(-\frac{S_1^2}{2\delta_s^2(R_1+R_2+R_3+1)}\right) \quad (28)$$

式中 $R_3=\frac{E[\alpha_3^2]}{2\delta_s^2}=\frac{\alpha_{03}^2}{2\delta_s^2}$ ,并记 $SIR_1=\frac{\alpha_{03}^2}{\alpha_{02}^2}=\frac{R_3}{R_2}$ 。

同样,采用仿真的方式来获取3个目标情况下的 $f(S_1)$ 近似为高斯分布即式(28)的条件。计算仿真中选取 $\delta_s^2=1$ 。仿真结果见图4~图6。

由仿真结果可看出3个目标情况下:(1)当目标信噪比较低时,见图4(c),此时 $f(S_1)$ 与 $f_{g1}(S_1)$ 之间的存在较好的近似;(2)当回波功率较大的两个目标的信噪比相差不大时,见图5(a)(此时 $SIR=2, SIR_1=5$ ,即 $R_1, R_3$ 相差约4dB), $f(S_1)$ 与 $f_{g1}(S_1)$ 有很好的近似;而相差较大时,如图5(c),此时 $R_1, R_3$ 相差

8dB多, $f_1(S_1)$ 与 $f_{g1}(S_1)$ 的近似就不太合理;图6为功率较大的两个目标的信噪比相差较大时(此时 $R_2$ 与 $R_3$ 相差10dB)时, $f(S_1)$ 与 $f_{g1}(S_1)$ 之间存在的的近似,随第3个目标的信噪比(这里为 $R_1$ )的增加稍有改变但不大,这说明功率较大的两个目标对输出信号近似为高斯分布影响最大。

同样经过大量仿真,发现3个目标情况下, $f(S_1)$ 可近似为 $f_{g1}(S_1)$ 的一般条件是信噪比较大的两个目标,它们的信噪比相差不大于7dB。当信噪比最大的目标的信噪比较低时,上述两信噪比差可适当大些,见图5(c)。可见,上述近似条件同两个目标时基本一致。

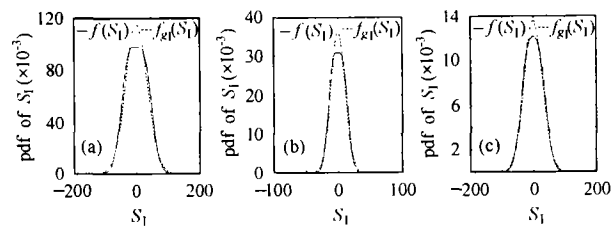


图4 SNR变化时 $f(S_1)$ 和 $f_{g1}(S_1)$ 的仿真曲线(SIR=SIR<sub>1</sub>=0.1)

(a)SNR=30dB SIR=0.1 SIR<sub>1</sub>=0.1 (b) SNR=30dB SIR=0.1 SIR<sub>1</sub>=0.1  
(c) SNR=30dB SIR=0.1 SIR<sub>1</sub>=0.1

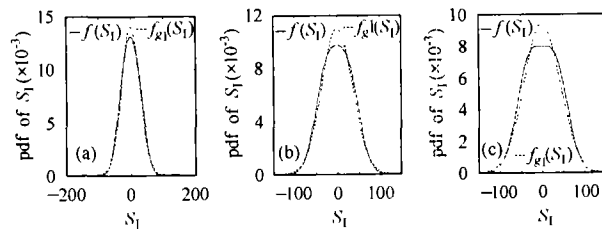


图5 SIR<sub>1</sub>变化时 $f(S_1)$ 和 $f_{g1}(S_1)$ 的仿真曲线(SIR=2,SNR=20dB)

(a)SNR=20dB SIR=2 SIR<sub>1</sub>=5 (b) SNR=20dB SIR=2 SIR<sub>1</sub>=10  
(c) SNR=20dB SIR=2 SIR<sub>1</sub>=15

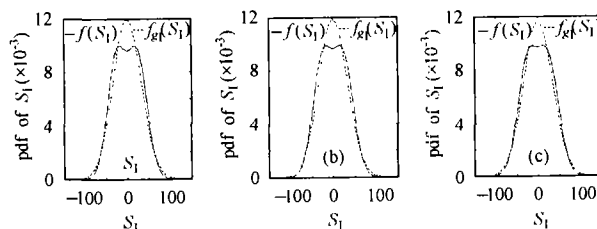


图6 SIR变化时 $f(S_1)$ 和 $f_{g1}(S_1)$ 的仿真曲线(SIR=10,SNR=20dB)

(a)SNR=20dB SIR=0.1 SIR<sub>1</sub>=10 (b) SNR=20dB SIR=0.4 SIR<sub>1</sub>=10  
(c) SNR=20dB SIR=0.8 SIR<sub>1</sub>=10

根据上面两个目标及3个目标情况下输出信号近似为高斯分布条件的研究,可推知当 $n$ 个信噪比不等的斯威林4型目标存在时,只要信噪比最大的两个目标,它们的信噪比相差不大于7dB,则输出信号 $S_1, S_Q, D_1$ 及 $D_Q$ 都可近似为高斯分布,因而它们的联合概率密度可近似为均值为零、协方差矩阵为式(30)的高斯分布。

$$E\left\{\begin{bmatrix} S_1 & D_1 & S_0 & D_0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_1 & D_1 & S_0 & D_0 \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} \delta_1^2 & a & 0 & 0 \\ a & \delta_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1^2 & a \\ 0 & 0 & a & \delta_2^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \delta_1^2 &= E(S_1^2) = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \alpha_{0i}^2 + 2\delta_s^2 \right) \\ \delta_2^2 &= E(D_1^2) = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \eta_i^2 \alpha_{0i}^2 + 2\delta_d^2 \right), \quad a = \sum_{i=1}^n \eta_i \alpha_{0i}^2 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

#### 4 结束语

本文主要对多个斯威林4型目标存在时输出信号的概率分布进行了推导。通过大量仿真, 得出了“多个 Swerling 4 型目标回波中功率最大的两个信噪比相差不大于 7dB 时输出信号可以近似为高斯分布”这一结论。该结论同文献[4]中给出的结论存在差异。在近似高斯条件下, 作者在另文中研究了采用瑞利目标情况下的方法对多个斯威林4型目标的检测与分辨。

#### 参考文献

[1] 何友, 关键等著. 雷达自动检测及恒虚警处理. 北京: 清华大

学出版社, 1999: 4-5.

- [2] Blair W D, Brandt-Pearce M. Unresolved Rayleigh target detection using monopulse measurements. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(2): 543-551.
- [3] Blair W D, Brandt-Pearce M. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 452-469.
- [4] Sinha A, Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 183-201.
- [5] Zhang Xin, Willett P, Bar-Shalom Y. Monopulse radar detection and localization of multiple targets via joint multiple-bin processing. *Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference*, Huntsville Alabama, 2003: 232-237.
- [6] 中山大学数学力学系《概率论及数理统计》编写小组编. 概率论及数理统计(上册). 北京: 人民教育出版社, 1980: 237-270.

李朝伟: 男, 1970年生, 博士生, 从事信号处理、数据融合及抗干扰等方面的研究。

王宏强: 男, 1970年生, 副教授, 主要研究方向为多传感器数据融合、目标跟踪及自动目标识别等。

黎湘: 男, 1967年生, 教授, 主要研究方向为非线性信号处理、信息融合、精确制导与自动目标识别等。