

网络雷达中快起伏 Rician 目标检测性能分析

刘月平^{*①} 姜秋喜^{①②} 毕大平^{①②} 崔瑞^{①②}

^①(电子工程学院 合肥 230037)

^②(安徽省电子制约技术重点实验室 合肥 230037)

摘要: 该文研究了总发射功率一定的条件下, 网络雷达 4 种模式中快起伏 Rician 目标检测性能。结果表明快起伏 Rician 目标可分成 3 类, 且对于不同的分类具有不同的检测特性, 具体表现为: 类斯怀林 II 目标的检测性能与斯怀林 II 目标相同, 标准快起伏 Rician 目标显示出与斯怀林 II 目标不同的检测性能, 混合快起伏 Rician 目标, 除了 MIMO 模式与标准快起伏 Rician 目标变化规律一致外, 其他模式均与斯怀林 II 变化规律相同。研究结果对网络雷达的系统设计具有一定的指导意义。

关键词: 网络雷达; 快起伏; Rician 目标; 检测性能

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1671-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01196

The Detection Performance Analysis of Network Radar on Rician Targets of Pulse-to-pulse Fluctuation

Liu Yue-ping^① Jiang Qiu-xi^{①②} Bi Da-ping^{①②} Cui Rui^{①②}

^①(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

^②(Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei 230037, China)

Abstract: The detection performance of the four different kinds of network radar models on Rician model of pulse-to-pulse fluctuation is analyzed when the total power of single pulse of the transmitters is definite. The simulated and analyzed results show that Rician targets of pulse-to-pulse fluctuation can be divided to three kinds which have different detection performance. In the network radar, the detection performance of Class-Swerling II targets is like Swerling II, and the detection performance of standard Rician targets of pulse-to-pulse fluctuation is different from Swerling II targets, and the detection performance of mixed Rician targets of pulse-to-pulse fluctuation is like Swerling II targets except that it is like Standard Rician targets for MIMO model. The results are useful to design the network radar system.

Key words: Network radar; Pulse-to-pulse fluctuation; Rician targets; Detection performance

1 引言

随着先进的信号处理技术、电子技术和电子对抗技术的发展, 现代雷达面临着巨大的挑战和更加复杂的任务。这些任务和挑战主要表现在^[1]: 雷达应具有远距离探测弱目标的能力, 特别是探测隐身目标的能力; 雷达应能实现对目标的分辨和识别, 并能进行杀伤力评估; 现代雷达的工作环境十分恶劣, 特别是有源干扰和反辐射导弹对雷达生存构成了巨大的威胁, 因此雷达应具有抗信号截获能力; 当然雷达还应具有大的威力范围, 具有同时搜索和跟踪多目标的能力, 能进行数据融合、航迹计算和威胁评估等。寻求利用新的理论和技术途径以提高现代

雷达的性能, 是雷达设计者一直追求的目标。网络雷达正是因此而提出的崭新概念^[2]。网络雷达以网络为基础, 通过联网技术将地域上分散的、异地部署的多部发射站、多部接收站和网络中心站链接成一个有机整体, 形成一个时域、空域、频域协调工作的一体化综合电子信息系统^[2]。与一般雷达系统不同的是, 网络雷达以网络方式工作, 各发射站、接收站作为网络节点通过网络协议和网络设备实现与网络中心站的连接, 允许用户在任何时间、任何地点访问网络共享数据, 具有很高的灵活性、移动性和便利性^[2]。

雷达与雷达目标是紧密相关的, 雷达界的学者和雷达工程设计者都需要了解并掌握雷达的目标特性。现有的网络雷达研究均假设目标为 Rayleigh 目标^[2-5], 且都是对单脉冲情况进行的研究, 这样的

2010-11-04 收到, 2011-01-21 改回

安徽省电子制约技术重点实验室基金(200713002005E)资助课题

*通信作者: 刘月平 taokouliu2006@sohu.com

研究不是很全面,实际上多脉冲积累条件下 Rician 目标模型^[6]这种较通用的目标模型的检测性能的研究更具有现实意义。与普通雷达多脉冲积累方式类似,网络雷达多脉冲积累方式也分为视频积累和相参积累两种。本文主要研究空间分集时有源模式网络雷达在收发一体模式下对快起伏 Rician 目标的检测性能^[7],脉冲积累采用视频积累方式,如无特别说明,将这种情况下的网络雷达简称为网络雷达。

2 信号模型

网络雷达信号矩阵可以写成如下形式的矢量 \mathbf{X} ^[7]:

$$\mathbf{X} = [x_{111} \cdots x_{11L} \cdots x_{M11} \cdots x_{M1L} \cdots x_{MNL} \cdots x_{MNL}]^T \quad (1)$$

根据网络雷达处理回波信号的方式不同将其分成以下几种模型^[7]:

(1)空间分集 MIMO 模式简称 MIMO 模式,中心式非相干检测

$$\left\| \mathbf{X} + \frac{\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{E/M}} \mathbf{h}_1 \right\|_{H_1}^2 \geq \lambda_{\text{MIMO}} \quad (2)$$

假设 σ_n^2 , \mathbf{h}_1 和 μ 是已知的, σ_n^2 表示单通道噪声功率。 \mathbf{h}_1 为 $MNL \times 1$ 维列复矢量且有^[6]

$$\mathbf{h}_1 = \sqrt{\frac{K}{1+K}} \text{vec}(\text{diag}(\mathbf{a}) \bar{\mathbf{h}} \text{diag}(\mathbf{b})) \quad (3)$$

考虑 $\bar{\mathbf{h}}$ 中所有元素均为 1 的简单情况,此时^[6]

$$\|\mathbf{h}_1\|^2 = MNL \frac{K}{1+K} \quad (4)$$

$\mu = \sqrt{1/(1+K)}$ 为标量,这个判决规则是从 MIMO 模式的似然比检测得到的^[6], λ_{MIMO} 表示门限。

(2)RPNR(RePhased coherent Netted Radar)模式,中心式相干检测(重定相)

$$\sum_{i=1}^L \left| \sum_{k=1}^{MN} (x_k) \exp\{-j\phi_k\} + \frac{MN\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{P_{\text{rnr}}}} \mathbf{h}_1 \right|_{H_1}^2 \geq \lambda_{\text{RPNR}} \quad (5)$$

其中 ϕ_k 当目标存在时需要的信号相位。

(3)NR(Coherent Netted Radar)模式,中心式相干检测(非重定相)

$$\sum_{i=1}^L \left| \sum_{k=1}^{MN} x_k + \frac{MN\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{P_{\text{nr}}}} \mathbf{h}_1 \right|_{H_1}^2 \geq \lambda_{\text{NR}} \quad (6)$$

其中 λ_{NR} 表示门限值。

(4)MW(Mobile Windows)模式,非中心式非相干检测,两步非相干处理方式。

$$\sum_{k=1}^{MN} v[k]_{H_1} \geq L_0 \quad (7)$$

单次检测的门限 L_0 可以用如下的公式^[8]:

$$L_0 = [MN/2] \quad (8)$$

其中 $[Q]$ 表示包含 Q 的最大整数。该判决规则可以提高系统的总体抗干扰能力。

网络雷达各模式对快起伏 Rician 目标处理结构如图 1 所示。

图 1 中 MIMO 模式和 MW 模式第 l 个脉冲时每个滤波器均输出一个偏移量 $\frac{\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{E/M}} h_{1l}$, 而 RPNR

和 NR 第 l 个脉冲时偏移量则分别为 $\frac{MN\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{P_{\text{rnr}}}} h_{1l}$,

$\frac{MN\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{P_{\text{nr}}}} h_{1l}$ 。其中 $h_{1l} = \sqrt{\frac{K}{1+K}} (\cos \theta_{il} + j \sin \theta_{il})$,

$h_{1l} = \sqrt{\frac{K}{1+K}} (\cos \theta_l + j \sin \theta_l)$, θ_{il} 表示第 l 个脉冲时

第 i ($i = 1, 2, \dots, MN$) 个收发通道的总相位延迟, P_{rnr} 和 P_{nr} 分别表示 RPNR 模式和 NR 模式的单脉冲平均总接收功率。

3 网络雷达中快起伏 Rician 目标检测性能分析

由文献[9]可知,双基地雷达方程为

$$\text{SNR}(m, k, l) = \frac{P_{il} G_T(m_l) G_R(k_l) \lambda^2 \sigma(\theta_{m,k,l}, \phi_{m,k,l})}{M (4\pi)^3 R_{tm}^2 R_{rk}^2 L_0 \text{KTBF}} = \frac{P_r(m, k, l)}{\text{KTBF}} \quad (9)$$

其中 $P_r(m, k, l) = (1/M) \rho_{m,k,l}^0 \sigma(\theta_{m,k,l}, \phi_{m,k,l})$ 和 KTBF 分别表示单个脉冲时的单通道接收功率和单通道噪声

功率; $\rho_{m,k,l}^0 = P_{il} \frac{G_T(m_l) G_R(k_l) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{tm}^2 R_{rk}^2 L}$ 表示第 l 个脉冲时

的接收功率完全系数(含距离项), $G_T(m_l)$ 和 $G_R(k_l)$ 分别表示第 l 个脉冲时的发射和接收天线增益;

$\sigma(\theta_{m,k,l}, \phi_{m,k,l})$ 表示第 l 个脉冲时的目标 RCS; P_{il} 表示第 l 个脉冲的总发射功率; R_{tm} 和 R_{rk} 分别表示发射机到目标和目标到接收机的距离。

下面的过程均认为:总的单脉冲发射功率 P_{il} 和单通道单脉冲噪声功率一定, $G_T(m_l)$, $G_R(k_l)$, λ , L_0 均为常量,收发与目标之间的距离一定(因为各个收发站之间的距离远小于收发站到目标的距离,即远场的情况),且认为收发与目标之间的距离相等即 $R_{tm} = R_{rk} = R$,也就是含距离项的接收功率完全系数是一定的。将信噪比 SNR 定义为 $\text{SNR} = \rho_{m,k,l}^0 \sigma_0 / \text{KTBF}$,可知此时的 SNR 不随工作模式,脉冲数和通道数的变化而变化。

网络雷达噪声功率与目标特性无关,但其决定系统门限的值,也就间接影响到发现概率的大小。根据前面给出的网络雷达各模式检验统计量可知,

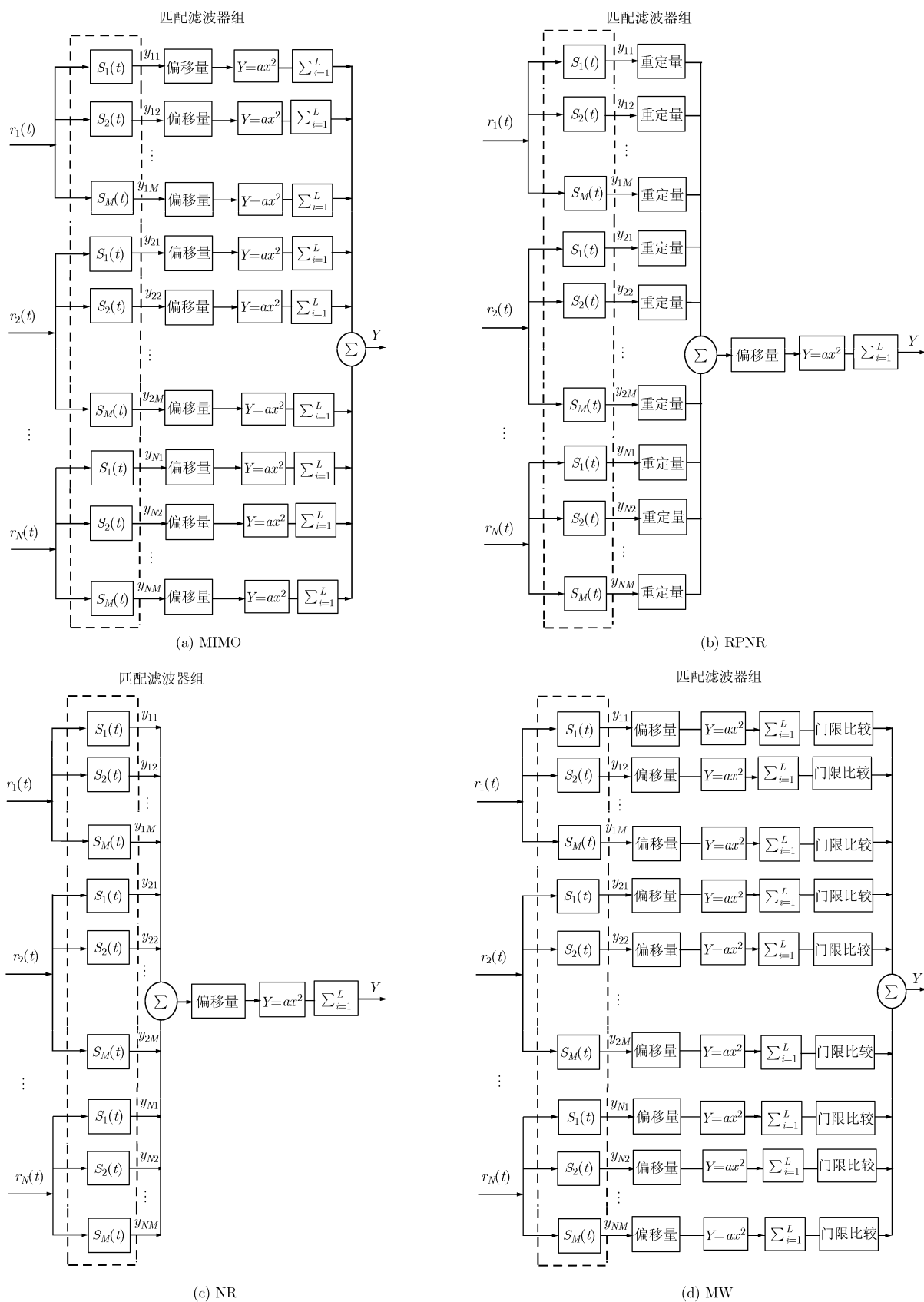


图 1 网络雷达不同模式的信号处理框图

网络雷达各模式噪声功率的分布如下:

MIMO 模式:

$$T_{\text{mimo}} = \sum_{k=1}^{MNL} \left| n_k + \frac{\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{E/M}} h_{1k} \right|^2, H_0 \quad (10)$$

NR 和 RPNR 模式:

$$T_{\text{nr}} = \sum_{i=1}^L \left| \sum_{k=1}^{MN} n_k + \frac{MN\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{P_{\text{nr}}}} \mathbf{h}_1 \right|^2, H_0 \quad (11)$$

$$T_{\text{rpnr}} = \sum_{i=1}^L \left| \sum_{k=1}^{MN} n_k + \frac{MN\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{P_{\text{rpnr}}}} \mathbf{h}_1 \right|^2, H_0 \quad (12)$$

MW 模式:

$$T_{\text{mw}} = \sum_{k=1}^{MN} v[k] \quad (13)$$

$$v[k] = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^L \left| n_i + \frac{\sigma_n^2}{\mu^2 \sqrt{E/M}} h_{1i} \right|^2 \geq \lambda_{\text{mw}}(k) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

一般假定噪声服从复正态分布 $n_k \sim CN(0, \sigma_n^2)$, 即 $n_k = n_{kx} + jn_{ky}$, (n_{kx}, n_{ky} 独立同分布, 且 $n_{kx} \sim N(0, \sigma_n^2/2)$), 且各通道噪声相互独立。因此可得

$$\begin{aligned} T_{\text{mimo}} &\sim \frac{\sigma_n^2}{2} \chi_{2MNL}^2(\lambda_{0\text{mimo}}), T_{\text{nr}} \sim \frac{MN\sigma_n^2}{2} \chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{nr}}), \\ T_{\text{rpnr}} &\sim \frac{MN\sigma_n^2}{2} \chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{rpnr}}), T_{\text{mw}} \sim \frac{\sigma_n^2}{2} \chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{mw}}) \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\chi_A^2(B)$ 表示自由度为 A 非中心化参数为 B 的非中心化 χ^2 分布。式(15)中各非中心化参量分别为

$$\begin{aligned} \lambda_{0\text{mimo}} &= \frac{2M^2NLK(1+K)}{\text{SNR}}, \lambda_{0\text{nr}} = \frac{2LK(1+K)}{\text{SNR}_{\text{nr}}}, \\ \lambda_{0\text{rpnr}} &= \frac{2LK(1+K)}{\text{SNR}_{\text{rpnr}}}, \lambda_{0\text{mw}} = \frac{2MLK(1+K)}{\text{SNR}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{SNR}_{\text{rpnr}} = \frac{P_{\text{rpnr}}}{MN\sigma_n^2}, \text{SNR}_{\text{nr}} = \frac{P_{\text{nr}}}{MN\sigma_n^2} \quad (17)$$

于是可得网络雷达各模式的虚警概率 P_{fa} 如下:

$$\begin{aligned} P_{\text{famimo}} &= P\{T_{\text{mimo}} \geq \lambda_{\text{mimo}} | H_0\} \\ &= 1 - P\{\chi_{2MNL}^2(\lambda_{0\text{mimo}}) \leq (2/\sigma_n^2)\lambda_{\text{mimo}}\} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{fanr}} &= P\{T_{\text{nr}} \geq \lambda_{\text{nr}} | H_0\} \\ &= 1 - P\left\{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{nr}}) \leq \frac{2}{MN\sigma_n^2}\lambda_{\text{nr}}\right\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{farpnr}} &= P\{T_{\text{nr}} \geq \lambda_{\text{rpnr}} | H_0\} \\ &= 1 - P\left\{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{rpnr}}) \leq \frac{2}{MN\sigma_n^2}\lambda_{\text{rpnr}}\right\} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{famw}} &= P\{T_{\text{mw}} \geq L | H_0\} \\ &= \sum_{k=L}^{MN} \binom{MN}{k} P_{\text{fa}}^k (1 - P_{\text{fa}})^{MN-k} \approx \binom{MN}{L} P_{\text{fa}}^L \end{aligned} \quad (21)$$

$$P_{\text{fa}} = P\left\{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{mw}}) \geq \frac{2\lambda_{\text{mw}}}{\sigma_n^2}\right\} \quad (22)$$

式(22)中的 P_{fa} 为 MW 模式的单通道虚警概率。

由虚警概率确定的标准化门限分别为

$$\frac{\lambda_{\text{mimo}}}{\sigma_n^2} = Q_{\chi_{2MNL}^2(\lambda_{0\text{mimo}})}^{-1}(P_{\text{famimo}})/2 \quad (23)$$

$$\frac{\lambda_{\text{nr}}}{\sigma_n^2} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{nr}})}^{-1}(P_{\text{fanr}}) \times MN/2 \quad (24)$$

$$\frac{\lambda_{\text{rpnr}}}{\sigma_n^2} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{rpnr}})}^{-1}(P_{\text{farpnr}}) \times MN/2 \quad (25)$$

$$\frac{\lambda_{\text{mw}}}{\sigma_n^2} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{mw}})}^{-1}(P_{\text{fa}}) \approx Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{0\text{mw}})}^{-1}\left(\frac{P_{\text{famw}}}{\binom{MN}{L}}\right)^{1/L} / 2 \quad (26)$$

其中 $Q_{\chi_{A(B)}^2}(C)$ 表示自由度为 A 非中心化参数为 B 的非中心化 χ^2 分布的反函数在 C 处的值。

对快起伏 Rician 目标, MIMO 模式在有目标时检测概率为^[6]

$$\begin{aligned} P_{\text{dmimo}} &= P\{T_{\text{mimo-Rician}} > \lambda_{\text{mimo}} | H_1\} \\ &= Q_{\chi_{2MNL}^2(\lambda)}\left(\frac{1}{\frac{\text{SNR}}{M(1+K)} + 1} \frac{2\lambda_{\text{mimo}}}{\sigma_n^2}\right) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{2}{\mu^2} + \frac{2M}{\rho\mu^4}\right) \|\mathbf{h}_1\|^2 = 2MNLK + \frac{2M^2NLK(1+K)}{\text{SNR}} \quad (28)$$

其中 $Q_{\chi_{A(B)}^2}(C)$ 表示自由度为 A 非中心化参数为 B 的非中心化 χ^2 分布在 C 处的值。将式(23)代入式(27)可得

$$P_{\text{dmimo}} = Q_{\chi_{2MNL}^2(\lambda)}\left(\frac{1}{\frac{\text{SNR}}{M(1+K)} + 1} Q_{\chi_{2MNL}^2(\lambda_{0\text{mimo}})}^{-1}(P_{\text{famimo}})\right) \quad (29)$$

故可得 MIMO 模式的单通道 ($m=n=1$) 检测概率为

$$P_{\text{dx}} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{1x})}\left(\frac{1}{1+K} \frac{2\lambda_x}{\sigma_n^2}\right) \quad (30)$$

$$\lambda_{1x} = 2LK + \frac{2LK(1+K)}{\text{SNR}_x} \quad (31)$$

而 Rician 目标模型下网络雷达 RPNR, NR 和 MW 模式在不同通道数时的发现概率与 SNR 的关系, 可将其等效为 MIMO 模式在收发站数目均为 1 时多脉冲视频积累的情况。此时只需要在信噪比上

作一定变换即可，具体来说就是变换后信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{new}} = \frac{\text{单脉冲总接收信号功率}}{\text{单脉冲总噪声功率}} \quad (32)$$

由 Rician 目标特点可得^[6]

$$\begin{aligned} \sigma(\theta_{m,i}, \phi_{m,i}) &= \left\| \left[\sqrt{\frac{K}{1+K}} \bar{h}_{m,i} + \sqrt{\frac{1}{1+K}} h_{um,i} \right] e^{j(\varphi_{ri} + \varphi_{im})} \right\|^2 \\ &\sim \frac{\chi_1^2(K)}{1+K} \end{aligned} \quad (33)$$

于是网络雷达 RPNR, NR 和 MW 模式接收功率为(除了 MW 是单通道接收功率外, 其他均为总接收功率, 且均为远场情况):

$$\begin{aligned} P'_{\text{rpnr}} &= \left| \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N \sqrt{\frac{1}{M}} \rho_{m,k}^0 \sigma(\theta_{m,k}, \phi_{m,k}) \exp\{j\phi_0\} \right|^2 \\ &\approx MN^2 \rho_{m,k}^0 \left| \sqrt{\sigma(\theta_{m,k}, \phi_{m,k})} \right|^2 \sim \frac{MN^2 \rho_{m,k}^0}{1+K} \chi_1^2(K) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} P'_{\text{nr}} &= \left| \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N \sqrt{\frac{1}{M}} \rho_{m,k}^0 \sigma(\theta_{m,k}, \phi_{m,k}) \exp\{j\phi_{m,k}\} \right|^2 \\ &\approx N \rho_{m,k}^0 \left| \sqrt{\sigma(\theta_{m,k}, \phi_{m,k})} \right|^2 \sim \frac{N \rho_{m,k}^0}{1+K} \chi_1^2(K) \end{aligned} \quad (35)$$

$$P'_{\text{mw}} = \frac{1}{M} \rho_{m,k}^0 \sigma(\theta_{m,k}, \phi_{m,k}) \sim \frac{\rho_{m,k}^0}{M(1+K)} \chi_1^2(K) \quad (36)$$

其中 RPNR 和 NR 分别类似于文献[10]相参积累和非相参积累故可采用以上近似。

RPNR, NR 和 MW 模式变换后的单脉冲信噪比分别为

$$\text{SNR}_{\text{rpnr}} = \frac{E\{P'_{\text{rpnr}}\}}{\text{MNKTBF}} = \frac{\rho_{m,k}^0 MN^2}{\text{MNKTBF}} = N \times \text{SNR} \quad (37)$$

$$\text{SNR}_{\text{nr}} = \frac{E\{P'_{\text{nr}}\}}{\text{MNKTBF}} = \frac{\rho_{m,k}^0}{\text{MKTBF}} = \frac{1}{M} \times \text{SNR} \quad (38)$$

$$\text{SNR}_{\text{mw}} = \frac{E\{P'_{\text{mw}}\}}{\text{KTBF}} = \frac{\rho_{m,k}^0}{\text{MKTBF}} = \frac{1}{M} \times \text{SNR} \quad (39)$$

只需将新的信噪比和式(24)-式(26)代入式(30), 即可得各模式时的检测概率为

$$P_{\text{drpnr}} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{\text{rpnr}})} \left(\frac{1}{\frac{N}{1+K} \times \text{SNR} + 1} Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{\text{nr}})}^{-1} (P_{\text{fanr}}) \right) \quad (40)$$

$$P_{\text{dnr}} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{\text{nr}})} \left(\frac{1}{\frac{1}{M(1+K)} \times \text{SNR} + 1} Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{\text{nr}})}^{-1} (P_{\text{fanr}}) \right) \quad (41)$$

$$P_{\text{dmw}} = Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{\text{mw}})} \left(\frac{1}{\frac{1}{M(1+K)} \times \text{SNR} + 1} Q_{\chi_{2L}^2(\lambda_{\text{mw}})}^{-1} \left(\frac{P_{\text{fanw}}}{\begin{pmatrix} MN \\ L \end{pmatrix}} \right)^{1/L} \right) \quad (42)$$

将式(37)-式(39)分别代入式(31)可得

$$\lambda_{\text{rpnr}} = 2LK + 2LK(1+K)/(N \times \text{SNR}) \quad (43)$$

$$\lambda_{\text{nr}} = 2LK + 2LK(1+K)M/\text{SNR} \quad (44)$$

$$\lambda_{\text{mw}} = 2LK + 2LK(1+K)M/\text{SNR} \quad (45)$$

注意到此处 MW 模式的检测概率为单通道检测概率, 故其总检测概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{dmwglobal}} &= P\{T_{\text{mw}} \geq L_0 | H_1\} = P\left\{ \sum_{k=1}^{MN} v[k] \geq L_0 \right\} \\ &= \sum_{k=L_0}^{MN} \binom{MN}{k} P_{\text{dmw}}^k (1 - P_{\text{dmw}})^{MN-k} \end{aligned} \quad (46)$$

从这些公式并不能直接得出网络雷达对快起伏 Rician 目标检测性能特点, 下面通过仿真试验对其进行研究。

4 仿真试验

试验 1 虚警概率为 10^{-6} , 发射站数目为 3, 脉冲积累数为 6, 分别对 $k=0.01$ 和 $k=0.1$; $k=1$ 和 $k=10$ 时网络雷达不同模式对 Rician 目标检测性能进行仿真, 结果如图 2 所示。

试验 2 虚警概率为 10^{-6} , 脉冲积累数为 6, 分别对 $k=0.01$ 和 $k=0.1$; $k=1$ 和 $k=10$ 时网络雷达各模式在不同通道数时检测性能进行仿真, 结果如图 3, 图 4 所示。

结论: 由图 2 可知, 对于有限的通道数, $k=0.01$, $k=0.1$, $k=1$, $k=10$ 时网络雷达各模式对 Rician 目标的检测性能变化规律相同的, 均是 RPNR 最好, MIMO 次之, NR 效果最差, 高信噪比时 MIMO, MW 和 RPNR 的检测性能相差不大。而且网络雷达各模式均对较大 k 值检测性能较优。

由图 3 可知, 对 $k=0.01$ 时的 Rician 目标 RPNR 模式的检测性能随着通道数的增加而增加, NR 模式则相反: MIMO 模式和 MW 模式的检测性能在低信噪比时随着通道数的增加而降低而在高信噪比时与随着通道数的增加而增加。这与网络雷达对斯怀林 II 目标检测性能是相同的^[7]。故将 $k=0.01$ 时的目标称之为类斯怀林 II 目标。对 $k=0.1$ 时网络雷达各模式的检测性能除了 MIMO 模式与标准快起伏

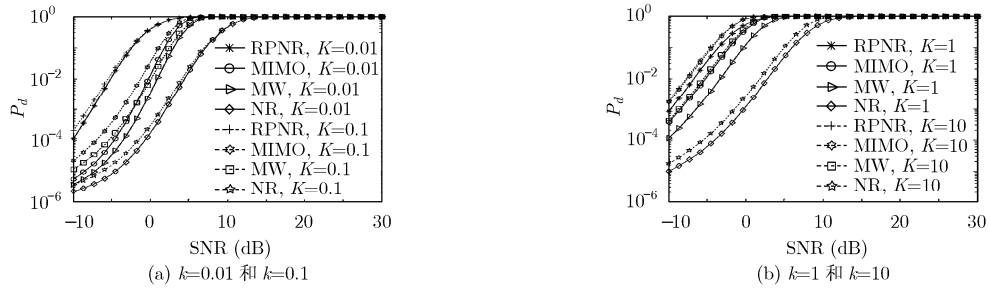


图2 网络雷达各模式对 Rician 目标的检测性能曲线

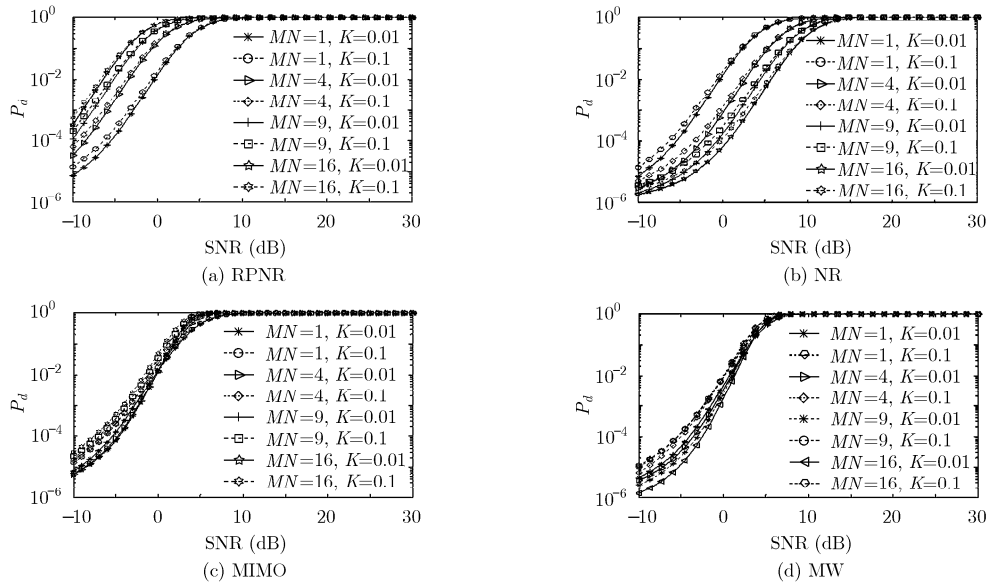


图3 网络雷达各模式对 Rician 目标的检测性能曲线($k=0.01$ 和 $k=0.1$)

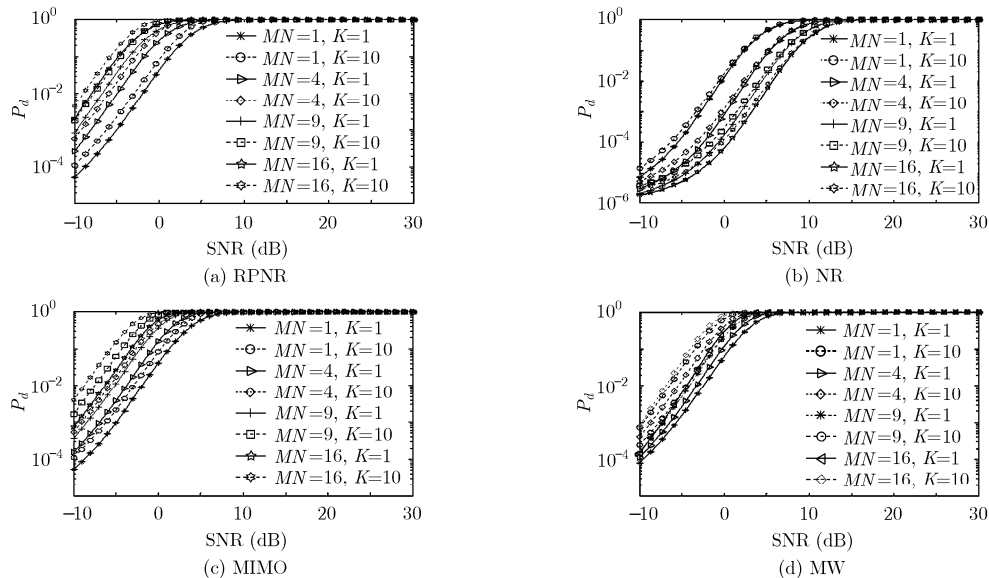


图4 网络雷达各模式对 Rician 目标的检测性能曲线($k=1$ 和 $k=10$)

Rician 目标变化规律是一样外，其他模式均与斯怀林 II 变化规律相同，故将 $k=0.1$ 时的目标称之为混合快起伏 Rician 目标。

由图 4 可知，网络雷达各模式对不同 $k=1,10$ 时 Rician 目标检测性能除了 NR 随着通道数增加而降低外均随着通道数的增加而增加。这与网络雷达中

斯怀林 II 目标的检测性能是不同的^[7], 故将其称之为标准快起伏 Rician 目标。

RPNR 模式对相同 k 值时的类斯怀林 II 目标的检测性能均随着通道数的增加而增加, NR 模式则相反。主要是因为对于 M 通道网络雷达。每个发射机能量为单基地时的 $1/\sqrt{M}$, 噪声因为是非相干叠加, 总的接收噪声能量为单通道的 M 倍, 而 RPNR 接收的信号能量是单通道的 M^2 倍, NR 接收的信号能量是单通道的 M 倍, 使 RPNR 获得通道增益 \sqrt{M} 而使 NR 获得通道增益 $1/\sqrt{M}$, 这就是 RPNR 随着通道数增加而检测性能增加而 NR 随着通道数增加而检测性能降低的原因。MIMO 模式之所以出现低信噪比时检测性能随着通道数的增加而降低, 高信噪比时检测性能随着通道数的增加而增加的情况, 主要是因为, 信噪比较低时, 发射通道衰减大于接收信道增益(即空间分集增益)使得系统检测性能随着通道数增加反而降低, 而信噪比较高时则相反, 此时发射通道衰减小于接收信道增益使得系统检测性能随着通道数增加而增加。MW 模式之所以出现低信噪比时检测性能随着通道数的增加而降低, 高信噪比时检测性能随着通道数的增加而增加的情况, 主要是因为, 不同通道数时的各子通道的门限不同, 通道数增加使各子通道门限减小, 但此时随着通道数的增加, 各子通道的发射功率减小, 在信噪比较低时门限增益小于通道损耗, 故检测性能随着通道数的增加而降低; 而在信噪比较高时门限增益大于通道损耗, 从而检测性能随着通道数的增加而增加。

网络雷达各模式对相同 k 值时的标准快起伏 Rician 目标检测性能除了 NR 模式随着通道数增加而降低外均随着通道数的增加而增加。主要是因为此时 MIMO 模式和 MW 模式相应的接收信道增益均大于其所带来的衰减, 这说明 k 值的变化影响到网络雷达各模式的增益与衰减关系变化。这也是网络雷达各模式对混合快起伏 Rician 目标检测性能产生变化的原因。

5 结束语

本文对总发射功率一定的条件下网络雷达对快起伏 Rician 目标的检测性能进行了研究。结果表明, 网络雷达对不同 k 值时的快起伏 Rician 目标的检测性能是不同的, 对于类斯怀林 II 目标(较小的 k 值如 $k \leq 0.01$)网络雷达的检测性能与斯怀林 II 目标相似, 对于标准快起伏 Rician 目标(较大 k 值如 $k > 1$)

网络雷达显示出与斯怀林 II 目标不同的检测性能, 而对于混合快起伏 Rician 目标(一般 $1 > k > 0.01$), 除了 MIMO 模式与标准快起伏 Rician 目标变化规律一致外, 其他模式均与斯怀林 II 变化规律相同。

这对网络雷达不同模式的选择和相应的通道数的选取提供了相应的理论指导。下一步的研究方向是网络雷达不同模式对慢起伏 Rician 目标等其他各起伏目标的检测性能分析, 这将为网络雷达的系统设计提供相应的理论支持。

参考文献

- [1] 屈金佑. MIMO 雷达检测技术研究. [博士学位论文], 电子工程学院, 2009.
- [2] 安振. 网络雷达目标定位跟踪问题研究. [博士学位论文], 电子工程学院, 2009.
- [3] Fishler E, Haimovich A, Blum R S, Cimini L J Jr, Chizhik D, and Valenzuela R A. Spatial diversity in radars-models and detection performance. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [4] Fishler E, Haimovich A, Blum R, Cimini L, Chizhik D, and Valenzuela R. Performance of MIMO radar systems: advantages of angular diversity. *IEEE Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, New York: 2004, Vol. 1: 305-309.
- [5] Zheng Zhi-dong, Zhang Jian-yun, and Ma Peng. Angle estimation with automatic pairing for bistatic MIMO radar. *International Congress on Image and Signal Processing (CISP09)*, Tianjing, 2009.10, Vol. 1: 1-5.
- [6] 汤俊, 伍勇, 彭应宁, 王秀坛. MIMO 雷达对空域 Rician 起伏目标检测性能研究. *中国科学 F 辑: 信息科学*, 2009, 39(8): 866-874.
- [7] 刘月平, 姜秋喜, 毕大平. 网络雷达对 SWII 目标检测性能分析. *电路与系统学报*, 2010, 15(6): 18-24.
- [8] Schwartz M. A coincidence procedure for signal detection. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1956, 2(4): 135-139.
- [9] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 2007: 34-38.
- [10] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 138-141.

刘月平: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为信号处理、数据融合.

姜秋喜: 男, 1960 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子对抗侦察与干扰.

毕大平: 男, 1965 年生, 教授, 研究方向为雷达对抗侦察与干扰技术.

崔 瑞: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为雷达对抗侦察与干扰技术.