

The Resolution of the Network Radar

Mingliang LI, Qiuxi JIANG, Xiaoling HAN

Electronic Engineering Institute, Hefei, China

Email: hfeilml@126.com

Abstract: Network Radar realizes the incorporation of the active and passive, and is an innovation in the radar and radar-countermeasure fields. The paper simply introduces the concept, characteristics and work modes, and establishes the expression of the ambiguity function of the Network Radar. And it analyzes the resolution through the simulations. At last, the conclusion can be got which the passive information and the increased number of the transmitter and receiver can improve the resolution.

Keywords: Network Radar; Ambiguity Function; the resolution

网络雷达的目标分辨力

李明亮, 姜秋喜, 韩晓玲

电子工程学院, 合肥, 中国, 230037

Email: hfeilml@126.com

摘要: 网络雷达实现了有源与无源的一体化, 是雷达与雷达对抗领域的创新。论文简单介绍了网络雷达的概念、特点和工作模式, 建立了网络雷达模糊函数的表达式, 并通过仿真分析了网络雷达的目标分辨力。最后得出结论, 网络雷达的目标分辨力随着发射站和接收站数目的增加有所提高。此外, 网络雷达利用其获取的无源侦察信息也可以提高其距离和速度分辨力。

关键词: 网络雷达; 模糊函数; 目标分辨力

1 引言

雷达与雷达对抗是信息战中的两个关键环节, 既相互对立, 相互依存、相互促进、相互运动, 又相对统一。雷达与雷达对抗的一体化, 是现代战争与信息战的必然要求, 也是网络时代的必然趋势。网络雷达就是实现雷达与雷达对抗一体化的综合电子信息系统。

网络雷达由若干发射站、若干接收站、1 个网络中心站及 1 套网络通讯设备组成。若干发射站和若干接收站分散、异地部署, 通过网络与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。若干发射站根据预先编程或根据网络中心站的控制指令, 连续向空间发射覆盖全频段的探测或干扰信号; 或者各自独立, 非配合工作。若干接收站接收由空中目标反射的回波信号或空中目标辐射源发射的电磁信号, 网络中心站或其中任何一个接收站, 根据接收的目标反射回波或目标辐射源信号, 利用综合信息提取技术对目标进行探测、定位、识别和跟踪, 并由此给出目标的属性信息、三

维坐标信息、航迹信息和速度信息。

网络雷达具有两种基本的目标探测定位模式, 一种是利用目标反射(散射)回波进行探测定位的模式, 称为“有源模式”。在这种模式下, 网络雷达还兼有二次雷达的敌我识别功能, 即通过向目标发射敌我识别询问信号, 接收站根据应答信号完成对目标的敌我属性判别; 另一种是典型的无源侦察探测定位模式, 即利用目标辐射源发射的信号进行无源探测定位, 称为“无源模式”。在这种模式下, 网络雷达同时兼有电子情报侦察和电子支援侦察功能, 可利用接收站完成对辐射源信号的参数测量、侦察识别和干扰的参数引导功能^[1]。

2 网络雷达的模糊函数

假设发射站发射信号的复包络为 $s(t)$, 经空间两个点目标 A 和 B (两目标在距离和速度上均有差别) 散射后, 接收站接收的目标回波信号复包络分别为 $s(t-\tau_A)e^{j2\pi f_A t}$ 和 $s(t-\tau_B)e^{j2\pi f_B t}$, 其中 τ_k ($k=A, B$) 为回波延时, f_k ($k=A, B$) 为多普勒频移。采用均方差准则作为最佳分辨准则, 用两个信号的均方误差来衡量他

们之间的差别, 即

$$\begin{aligned}\varepsilon^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |s(t-\tau_A)e^{j2\pi f_A t} - s(t-\tau_B)e^{j2\pi f_B t}|^2 dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} [s(t-\tau_A)e^{j2\pi f_A t} - s(t-\tau_B)e^{j2\pi f_B t}] \\ &\quad [s^*(t-\tau_A)e^{-j2\pi f_A t} - s^*(t-\tau_B)e^{-j2\pi f_B t}] dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |s(t-\tau_A)|^2 dt + \int_{-\infty}^{\infty} |s(t-\tau_B)|^2 dt - \\ &\quad \int_{-\infty}^{\infty} [s(t-\tau_A)s^*(t-\tau_B)e^{j2\pi(f_A-f_B)t} + \\ &\quad s^*(t-\tau_A)s(t-\tau_B)e^{-j2\pi(f_A-f_B)t}] dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |s(t-\tau_A)|^2 dt + \int_{-\infty}^{\infty} |s(t-\tau_B)|^2 dt - \\ &\quad 2 \operatorname{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau_A)s^*(t-\tau_B)e^{j2\pi(f_A-f_B)t} dt \right]\end{aligned}\quad (1)$$

定义:

$$\begin{aligned}\chi(\tau_A, \tau_B, f_A, f_B) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau_A)s^*(t-\tau_B)e^{j2\pi(f_A-f_B)t} dt\end{aligned}\quad (2)$$

则称函数 $\chi(\tau_A, \tau_B, f_A, f_B)$ 为 $s(t)$ 的模糊函数。 $\chi(\tau_A, \tau_B, f_A, f_B)$ 的值越小, 则其分辨力越高^[2]。

网络雷达是一个全相参的雷达系统, 即网络雷达的所有工作站在时间、空间和相位上完全同步。整个网络雷达系统包含 M 个发射站和 N 个接收站, 整个系统协调一致工作, 每个接收站可以接收系统中所有发射站发射信号的回波, 并通过匹配滤波器组能够把这些回波信号单独地提取出来。所以网络雷达的模糊函数可表示为^[3]

$$X_{\text{network}} = \frac{1}{\gamma} \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \eta_{ij} \chi_{ij}(\tau_{Aij}, \tau_{Bij}, f_{Aij}, f_{Bij}) \right|^2 \quad (3)$$

式中, γ 为归一化因子, χ_{ij} 为第 i 个发射站和第 j 个接收站构成的收发单元的模糊函数。

$$\eta_{ij} = \frac{P_{Rij}}{\operatorname{Max}(P_{Rij})} \quad (4)$$

式中, P_{Rij} 为第 j 个接收站接收到第 i 个发射站发射信号的回波功率。

$$P_{Rij} = \frac{P_i G_i G_j \lambda_i^2 \sigma_{ij}}{(4\pi)^3 (R_i R_j)^2} \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 个发射站的发射功率; G_i 为第 i 个发射站的增益; G_j 为第 j 个接收站的增益; λ_i 为第 i 个发射站发射信号的波长; σ_{ij} 为目标相对于第 i 个发射站和第 j 个接收站的雷达截面积 (RCS);

R_{ii} 为第 i 个发射站和目标之间的距离; R_{jj} 为第 j 个接收站和目标之间的距离。

式(3)中的回波信号的时延 τ_{ij} 和多普勒频移 f_{ij} 可以用发射站、接收站、目标的位置坐标和目标的速度表示。

$$\begin{aligned}\tau_{ij}(x, y) &= (R_{ii} + R_{jj}) / c = \\ &\left[\sqrt{(tx_i - x)^2 + (ty_i - y)^2} + \sqrt{(rx_j - x)^2 + (ry_j - y)^2} \right] / c\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}f_{ij}(x, y, v_x, v_y) &= \\ &\left[\frac{(tx_i - x)v_x + (ty_i - y)v_y}{R_{ii}} + \frac{(rx_j - x)v_x + (ry_j - y)v_y}{R_{jj}} \right] \frac{1}{\lambda}\end{aligned}\quad (7)$$

式中, (tx_i, ty_i) 为第 i 个发射站的坐标, (rx_j, ry_j) 为第 j 个接收站的坐标, (x, y) 为目标的位置, (v_x, v_y) 为目标速度在 X 轴和 Y 轴上的分量, λ 为信号波长, c 为光速^[4]。

若考虑网络雷达获取的无源侦察信息, 即接收站接收到目标携带辐射源发射的信号, 网络雷达的模糊函数可表示为

$$X_{\text{H network}} = \frac{1}{\gamma} \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \eta_{ij} \chi_{ij} + \sum_{j=1}^N w_j \chi_{pj} \right|^2 \quad (8)$$

式中, χ_{pj} 为第 j 个接收站工作在无源模式时的模糊函数。 χ_{pj} 的定义与式(2)相同, 其中 $s(t)$ 为目标携带辐射源发射的信号, 时延 τ_j 和多普勒频移 f_j 用下面的式子求出。

$$\tau_j(x, y) = R_{jj} / c = \sqrt{(rx_j - x)^2 + (ry_j - y)^2} / c \quad (9)$$

$$f_j(x, y, v_x, v_y) = \frac{(rx_j - x)v_x + (ry_j - y)v_y}{R_{jj}} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

式(8)中,

$$w_j = \frac{P_{Rj}}{\operatorname{Max}(P_{Rj})} \quad (11)$$

式中, P_{Rj} 为第 j 个接收站接收到目标携带辐射源发射信号的功率。

$$P_{Rj} = \frac{P'_i G'_i G_j \lambda_p^2}{(4\pi R_{jj})^2} \quad (12)$$

式中, P'_i 为目标辐射源的发射功率; G'_i 为目标辐射源的增益; λ_p 为目标辐射源的发射信号波长; 其它参数同上。

3 网络雷达的目标分辨力仿真

下面以网络雷达中的两个发射站和两个接收站(两发两收)为例说明其模糊函数特性及目标分辨能力。

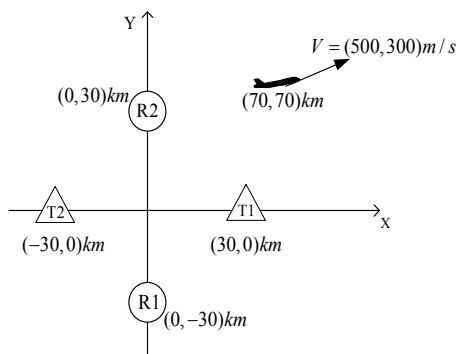


Figure 1 the structure diagram of radar the two made and two close

图 1. 网络雷达两发两收的结构示意图

图中, T 表示发射站, R 表示接收站, V 表示目标速度。图中给出了发射站、接收站和目标的位置坐标, 同时也给出了目标速度在 X 轴和 Y 轴上的分量。

假设两个发射站发射的信号相同, 且信号的复包络为

$$s(t) = \left(\frac{1}{\pi T^2} \right)^{1/4} \exp \left(-\frac{t^2}{2T^2} \right), \quad -\infty \leq t \leq \infty \quad (13)$$

则该信号的模糊函数为

$$\begin{aligned} \chi(\tau_A, \tau_B, f_A, f_B) &= \left(\frac{1}{\pi T^2} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(t - \tau_A)^2}{2T^2} \right) \exp \left(-\frac{(t - \tau_B)^2}{2T^2} \right) e^{j2\pi(f_A - f_B)t} dt \\ &= \left(\frac{1}{\pi T^2} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{2t^2 - 2(\tau_A + \tau_B)t + j4\pi T^2(f_A - f_B)t + \tau_A^2 + \tau_B^2}{2T^2} \right) dt \\ &= \left(\frac{1}{\pi T^2} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{((\tau_A + \tau_B)/2 - j\pi T^2(f_A - f_B))^2 - (\tau_A^2 + \tau_B^2)/2}{T^2} \right) \\ &\quad \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(t + (\tau_A + \tau_B)/2 + j\pi T^2(f_A - f_B))^2}{T^2} \right) dt \\ &= \exp \left(-\frac{(\tau_A - \tau_B)^2}{4T^2} - \pi^2 T^2 (f_A - f_B)^2 - j\pi(\tau_A + \tau_B)(f_A - f_B) \right) \\ &= \exp \left(-\frac{(\tau_A - \tau_B)^2}{4T^2} - \pi^2 T^2 (f_A - f_B)^2 \right) \exp(-j\pi(\tau_A + \tau_B)(f_A - f_B)) \end{aligned} \quad (14)$$

假设 $T = 1 \times 10^{-4} s$, 发射信号的波长为 $\lambda = 6.28 m$, 则由式(3)可得 T1 和 R1 组成的收发单元的距离、速度模糊函数和距离、速度分辨力(先不考虑网络雷达获取的无源侦察信息)。

同理, 由式(3)可得网络雷达两发两收(如图1所示)时的距离、速度模糊函数和距离、速度分辨力。

比较图3、图5和图7、图9可以看出, 网络雷达两发两收时的距离分辨力和速度分辨力都要高于收发单元的分辨力。

若考虑网络雷达接收站获取的无源侦察信息, 由式(8)可以得到网络雷达两发两收时的距离、速度模糊函数和距离、速度分辨力。假设接收站接收的目标辐射源发射的信号与发射站发射的信号样式相同, 但 $T = 0.1 \times 10^{-4} s$, 其它参数不变。

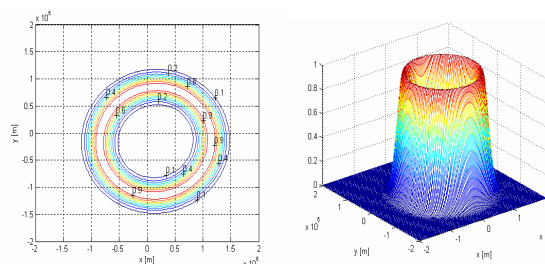


Figure 2 the ambiguity function Figure of the distance between sending and receiving unit plans formed by the T1 and R1

图 2. 由 T1 和 R1 组成的收发单元的距离模糊函数图

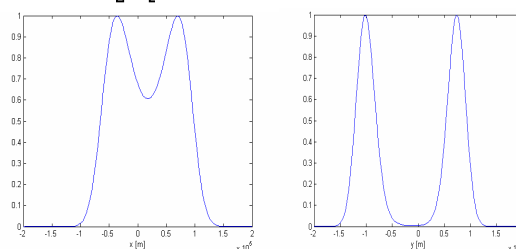


Figure 3 the distance resolution composed of the T1 and R1 transceiver unit

图 3. 由 T1 和 R1 组成的收发单元的距离分辨力

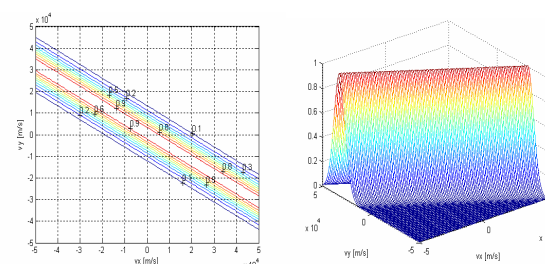


Figure 4 the speed of ambiguity function diagram comprised by the T1 and R1 transceiver unit

图 4. 由 T1 和 R1 组成的收发单元的速度模糊函数图

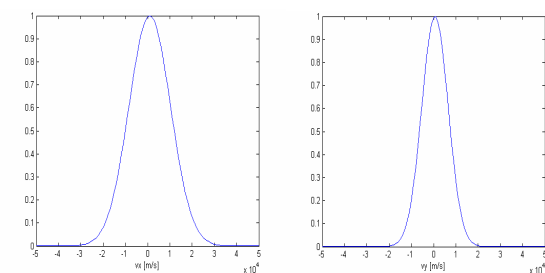


Figure 5 the speed resolution formed by sending and receiving unit of the T1 and R1.

图 5. 由 T1 和 R1 组成的收发单元的速度分辨率

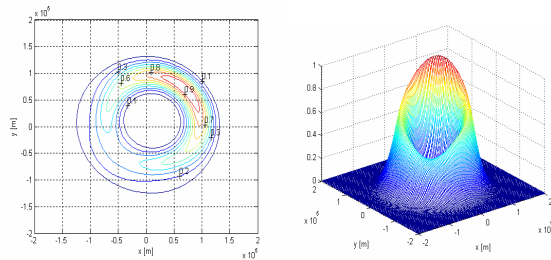


Figure 6 the range ambiguity function Figure of Network radar the two made and two close

图 6. 网络雷达两发两收时的距离模糊函数图

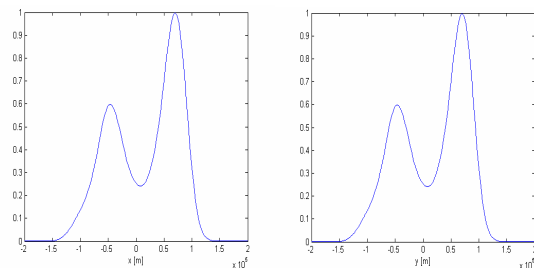


Figure 7 the range resolution of Network radar the two made and two close

图 7. 网络雷达两发两收时的距离分辨率

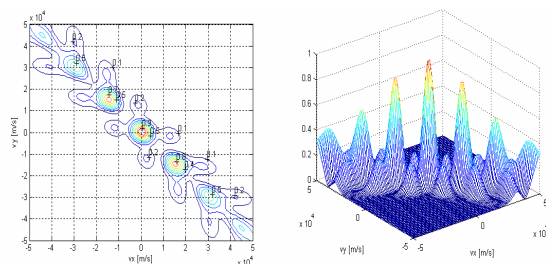


Figure 8 the range speed function Figure of Network radar the two made and two close

图 8. 网络雷达两发两收时的速度模糊函数图

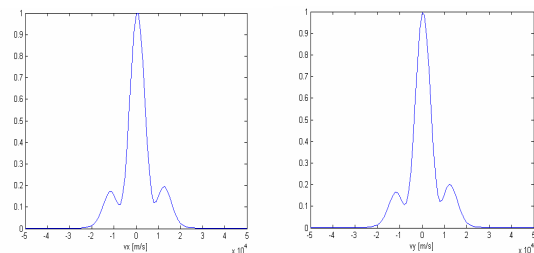


Figure 9 the speed resolution of Network radar the two made and two close

图 9. 网络雷达两发两收时的速度分辨率

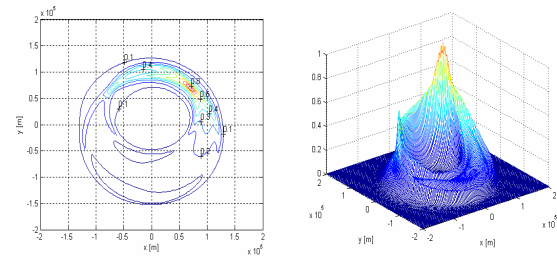


Figure 10 the range ambiguity function Figure of Network radar the two made and two close (Use of passive surveillance information)

图 10. 网络雷达两发两收时的距离模糊函数图
(利用了无源侦察信息)

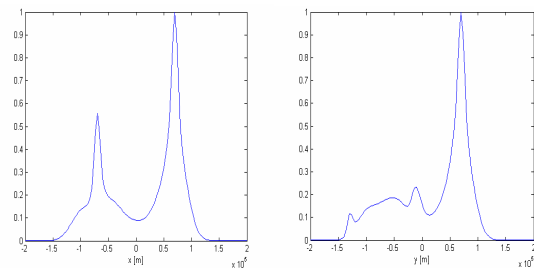


Figure 11 the range resolution of Network radar the two made and two close (Use of passive surveillance information)

图 11. 网络雷达两发两收时的距离分辨率
(利用了无源侦察信息)

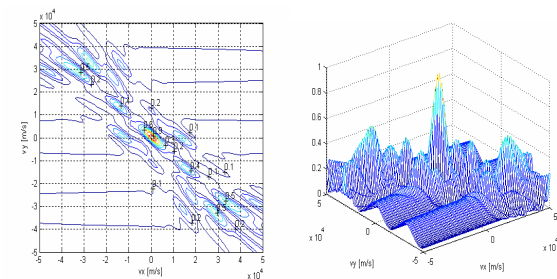


Figure 12 the range speed function Figure of Network radar the two made and two close (Use of passive surveillance information)

图 12. 网络雷达两发两收时的速度模糊函数图
(利用了无源侦察信息)

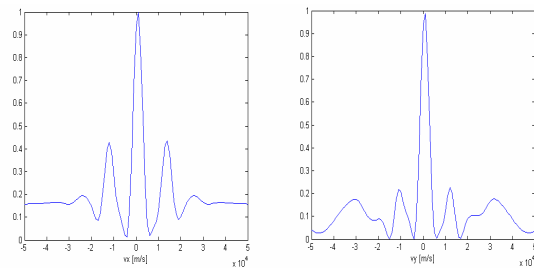


Figure 13 the speed resolution of Network radar the two made and two close (Use of passive surveillance information)

图 13. 网络雷达两发两收时的速度分辨率
(利用了无源侦察信息)

由图 11 和图 13 可以看出, 网络雷达两发两收时利用其获取的无源侦察信息能够提高距离分辨力和速度分辨力。

由以上仿真结果可得, 网络雷达的目标分辨力随着发射站和接收站数目的增加有所提高。此外, 网络雷达利用其获取的无源侦察信息也可以提高其距离和速度分辨力。

4 结束语

网络雷达实现了有源与无源的一体化, 是雷达与雷达对抗领域的创新。网络雷达的接收站具有宽带特性, 即可以接收到多部发射站发射信号的回波, 又可以侦察到目标携带辐射源发射的信号, 从而提高了其目标分辨力。网络雷达是一个广泛意义上的雷达系统, 具有不可比拟的优越性。网络雷达在其他方面的优势

将在以后的工作中进一步研究。

References (参考文献)

- [1] Jiang Qiu-xi, Li Ming-liang, Ding Feng: Network Radar and MIMO State Analysis, Electronic Warfare, 2007. 6–8.
姜秋喜, 李明亮, 丁锋: 网络雷达及其 MIMO 状态分析[J], 电子对抗, 2007. 6: 6–8.
- [2] Wang Xue-gang, Zhang Ming-you: Modern Signal theory, Bei Jing, Publishing house of electronic industry, 2005.
汪学刚, 张明友: 现代信号理论[M], 北京, 电子工业出版社, 2005: 204–210.
- [3] Y. Teng, H.D. Griffiths, C.J. Baker and K. Woodbridge: Netted radar sensitivity and ambiguity[J], IET Radar Sonar Navig., 2007, 1, (6), pp. 479–486.
- [4] Qu JinYou, Zhang JianYun, Liu Chun Quan: The Ambiguity Function of MIMO Radar[C], IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications, pp. 265–268.