

脉冲多普勒雷达同频干扰研究

王健, 王宝, 万华

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要: 在雷达网络化探测和舰艇编队中, 雷达之间的同频干扰是影响装备作战效能发挥的重要因素。针对脉冲多普勒体制雷达之间的同频干扰问题, 提出了脉冲多普勒体制雷达同频干扰模型, 并针对同频同步干扰和同频异步干扰两种情况进行仿真分析, 仿真结果表明所提出的同频干扰模型能够有效地对脉冲多普勒雷达之间的同频干扰进行定量分析评估, 同时表明脉冲多普勒雷达可通过严格时序控制, 降低雷达之间的同频干扰。研究结果对脉冲多普勒雷达同频干扰分析和多雷达优化组网探测体系设计具有指导作用。

关键词: 脉冲多普勒雷达; 同频干扰; 雷达组网; 舰艇编队

中图分类号: TN973; TN957 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2014)04-0441-05

Study on Co-Frequency Interference Between Pulse Doppler Radars

WANG Jian, WANG Bao, WAN Hua

(No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: The co-frequency interference between radar systems has a great effect on operational effectiveness of equipment in radar networks and ship formation. Focusing on the co-frequency interference between pulse-Doppler radar systems, a co-frequency interference model between pulse-Doppler radars has been proposed. Furthermore, simulations of co-frequency synchronous interference and co-frequency asynchronous interference have been carried out. The effectiveness of the proposed model has been proved by the simulation results. It also shows the severity of the co-frequency interference can be significantly reduced by rigorous control of time sequence between the radars. The results of the paper may server as a guide for the analysis on co-frequency interference between the pulse-Doppler radars as well as the radar cooperative network system design.

Key words: pulse-Doppler radar; co-frequency interference; radar networks; ship formation

0 引言

雷达网络化探测是未来雷达发展的重要方向之一。网络化探测将多部不同体制、不同频段、不同极化的雷达通过通信手段链接成网, 由中心站统一调配而形成一个有机整体, 其作战效能要远大于各自独立的雷达系统^[1]。然而, 在雷达网络化探测时, 往往存在多部相同频段雷达密集部署在很小的空间区域, 例如舰艇编队, 这些雷达同时开机时, 彼此之间存在着严重的同频干扰。这种己方雷达之间同频干扰将直接影响到雷达的探测能力、跟踪能力和抗干扰能力, 并将间接影响到组网探测系统或舰载编队预警系统作战效能的发

挥, 是困扰雷达组网探测和舰艇编队作战与训练的重要问题^[2-4]。

脉冲多普勒体制雷达具有很强的反杂波能力, 在陆基近程低空、舰载、机载和球载预警雷达中被广泛采用。与单脉冲雷达相比, 单脉冲雷达同频干扰时, 干扰回波表现为同心圆环(同频同步干扰)或旋转的齿轮状花瓣(同频异步干扰)^[5], 脉冲多普勒体制雷达同频同步干扰与单脉冲体制雷达类似, 但其同频异步干扰时, 经多普勒处理后会平均到每个多普勒通道, 通常表现为多普勒通道噪声基底电平的提升。本文针对脉冲多普勒体制雷达之间的同频干扰问题, 建立了脉冲多普勒体制雷达同频干扰模型, 并针对同频同步干扰和同频异步干扰两种情况进行仿真分析。

1 理论分析

假设有 A、B 两部雷达, 部署在同一高度层, 如图 1 所示。由一部雷达发射信号传输到另一部雷达的干扰功率可由式(1)表示^[6]:

$$P_J = P_i G_A \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_B \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{H} \quad (1)$$

式中, P_i 表示 A 雷达向空中发射的干扰功率; G_A 表示 A 雷达天线的增益; $\frac{1}{4\pi R^2}$ 为自由空间衰减项; $\frac{G_B \lambda^2}{4\pi}$ 为 B 雷达的等效接收面积; $\frac{1}{L}$ 表示各种损耗因子, 包括大气衰减、天线和馈线损耗等; H 表示前端滤波器的抑制度。

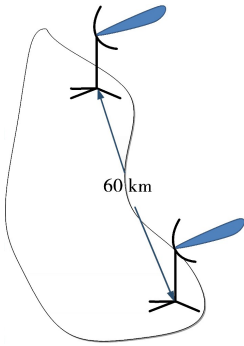


图 1 雷达部署示意图

假设 A 雷达发射脉宽为 τ_A , 重复频率为 f_A , 相参积累脉冲数为 N_A , B 雷达发射脉宽为 τ_B , 重复频率为 f_B , 相参积累脉冲数为 N_B , 则 B 雷达在一次相干处理时间内的发射时间和接收时间分别为

$$\begin{aligned} T_t^A &= N_B \tau_B \\ T_r^A &= N_B / f_B - N_B \tau_B \end{aligned} \quad (2)$$

在 B 雷达相干处理时间内, A 雷达一直以重复频率 f_A 发射脉宽为 τ_A 的干扰脉冲, 则在 B 雷达相干处理时间内一共接收到 A 雷达的干扰脉冲数为

$$N_J^{A-B} = \text{int}\left[\frac{N_B f_A}{f_B}\right] \quad (3)$$

式中, $\text{int}[\cdot]$ 为取整函数。那么在 B 雷达相干处理时间内接收到 A 雷达总干扰信号能量为

$$E_J = P_J N_J^{A-B} \tau_A \quad (4)$$

由于 A 雷达和 B 雷达彼此独立工作, 因此 A 雷达和 B 雷达发射脉冲是异步, 存在异步延时 τ_{A-B} 。当时延时 τ_{A-B} 取合适值时, 可能存在 A 雷达发射脉冲时 B 雷达刚好也处于发射状态, 这时 A

雷达的干扰脉冲被部分遮挡, 并未全部进入 B 雷达的接收通道, 因此还需考虑 B 雷达发射期间对 A 雷达干扰脉冲的遮挡, 考虑遮挡效应后, B 雷达相干处理时间内接收到 A 雷达总干扰信号能量可写为

$$E_J = P_J N_J^{A-B} \tau_A F \quad (5)$$

式中, F 为遮挡因子, 取值范围为 $[0, 1]$ 。遮挡因子的计算可以通过其最大值和平均值来表征, 最大值即 $F_{\max} = 1$ 表示两部雷达之间完全没有遮挡, 而平均值可以用式(6)表示:

$$F_{\text{avr}} = f_B \int_0^{1/f_B} F(\tau) d\tau \quad (6)$$

B 雷达进行脉冲多普勒处理时, B 雷达接收到总干扰信号能量 E_J , 在所有多普勒通道进行再次分配, 其分配后会抬高每个多普勒通道的噪声电平, 进而影响目标检测。重新分配后, 在各距离单元, 噪声功率抬起的幅度可能都不一样。

本文重点分析以下两种情况下脉冲多普勒雷达的同频干扰情况: 第一种情况为同频同步干扰情况, 即两部雷达重复频率相同或成整数倍关系; 第二种情况为同频异步干扰情况, 即两部雷达重复频率不同或不成整数倍关系。

在同频同步干扰情况下, 我们假设两部雷达重复频率完全相同, 即 $f_A = f_B$ 时, 如图 2(a) 所示。从图中可以看出干扰脉冲始终出现在每个脉冲重复周期相同的距离段, 因此干扰只对脉宽为 τ_A 距离段有效, τ_A 距离段外并不存在干扰信号, 干扰回波表现为同心圆环, 则相参积累后受干扰距离单元的干扰能量可由式(7)表示:

$$E_J = P_J N_J^{A-B} \tau_A = P_J N_B \tau_A F \quad (7)$$

由于干扰信号是失配的, 在脉压过程中并不能获取脉压增益, 则噪声信号的总能量可由式(8)表示:

$$N = k T_s B N_B \tau_A \quad (8)$$

则同频同步干扰情况下, 受干扰距离单元的干噪比可由式(9)表示:

$$JNR = \frac{P_J F}{k T_s B} \quad (9)$$

在同频异步干扰情况下, 我们假设两部雷达重复频率刚好参差 τ_A , 即 $\frac{1}{f_B} = \frac{1}{f_A} \pm \tau_A$ 时, 如图 2(b) 所示。这时干扰脉冲之间刚好彼此错开, 当积累脉冲数较多时, 积累后几乎所有的距离单元都存在干扰, 其受干扰距离单元的干扰能量可由

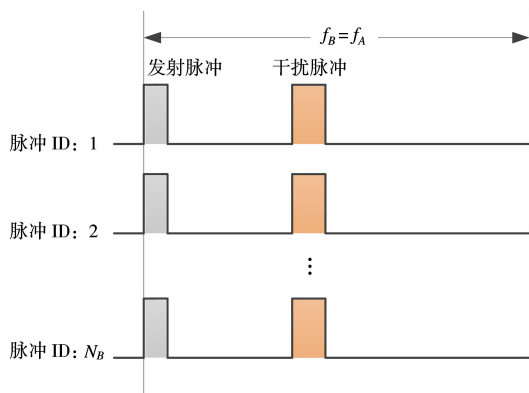
式(10)表示:

$$E_J = \begin{cases} P_J \tau_A F, & \frac{1}{f_B} > N_J^{A-B} \tau_A \\ P_J \tau_A F * N_J^{A-B} \tau_A f_B, & \frac{1}{f_B} < N_J^{A-B} \tau_A \end{cases} \quad (10)$$

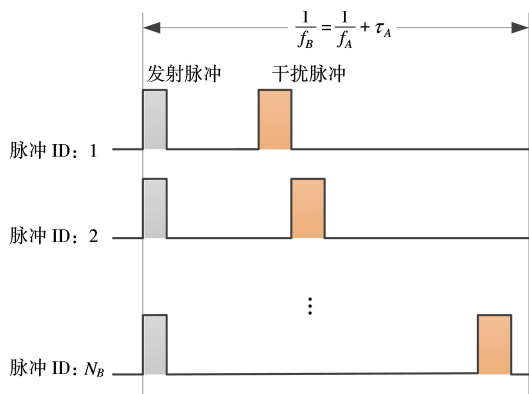
则同频异步干扰情况下,受干扰距离单元的干噪比可由式(11)表示:

$$JNR = \begin{cases} \frac{P_J F}{k T_s B N_B}, & \frac{1}{f_B} > N_J^{A-B} \tau_A \\ \frac{P_J F * N_J^{A-B} f_B}{k T_s B N_B}, & \frac{1}{f_B} < N_J^{A-B} \tau_A \end{cases} \quad (11)$$

从式(9)和(11)看,在同频异步时,干扰回波经多普勒滤波处理后,在雷达的各多普勒通道之间进行平均,从而大大降低了干扰信号对雷达工作性能影响。



(a) 同频同步干扰



(b) 同频异步干扰

图2 同频干扰示意图

根据上面理论模型,下面分别对某型雷达组网部署时其同频同步干扰情况和同频异步干扰情况进行理论分析。假设两部雷达进行组网部署,两雷达相距 60 km,其主要工作参数如下:工作频率为 L 波段(中心频率 1.3 GHz),发射功率为 7.9 W,发射天线增益为 30.5 dB,接收天线增益为 30.5 dB,

发射平均副瓣电平为 -20 dB,接收平均副瓣电平为 -25 dB,相参积累脉冲数为 64 个,信号带宽为 5 MHz,系统噪声等效温度为 570℃,平均脉冲重复频率为 1000 Hz,脉冲宽度为 64 μs,前端滤波器的抑制度为 50 dB,损耗因子为 5 dB。

由式(1)可得到 B 雷达接收机前端输入的干扰功率为 -100.31 dBW。在同频同步干扰情况下,B 雷达受到 A 雷达主瓣干扰和副瓣干扰时,其干噪比可由式(7)、式(8)和式(9)计算给出,分别为 33.74 dB 和 13.74 dB。在同频异步干扰情况下,B 雷达受到 A 雷达主瓣干扰和副瓣干扰时,其干噪比可由式(8)、式(10)和式(11)计算给出,分别为 21.53 dB 和 1.53 dB。从两种极端情况分析看,同频异步干扰情况下的干扰功率要远低于同频同步干扰情况下的干扰功率。

2 仿真分析

根据上面给出的雷达参数,我们建立信号处理模型,对 B 雷达受到 A 雷达同频干扰进行仿真分析,并对上述理论模型进行验证。由于主瓣干扰只在 A 雷达的主瓣正对 B 雷达时才发生,通过在干扰方位进行扇区静默可有效避免主瓣干扰。副瓣干扰只要雷达开机就一直存在,且无有效应对手段。鉴于此,本文只对 A、B 雷达组网部署时,副瓣干扰情况下的电磁兼容性进行仿真分析。

首先,我们对同频同步干扰情况进行仿真分析。在同频同步干扰情况下,雷达 A 和雷达 B 的脉冲重复频率相同。图 3(a)给出一个 CPI 处理周期内第 1,2,3 和 64 个脉冲的回波信号,从中可以看出干扰脉冲位于各脉冲回波的相同距离单元,积累后干扰功率增加 64 倍,同时由于噪声功率积累后也增加 64 倍,因此信号的干噪比与单个脉冲的干噪比一致。图 3(b)和图 3(c)分别给出了积累后各多普勒通道的干扰功率,由于雷达 A 的同频同步干扰使得噪声基底抬高了 13.75 dB 左右,这与前面理论分析结果相一致。需要指出的是雷达 B 接收到雷达 A 的干扰脉冲宽度为 64 μs,由于干扰脉冲是失配的,脉压后会展宽,展宽后脉冲宽度为 128 μs,所有的干扰能量都集中在 128 μs 的距离段,占整个雷达探测距离单元的 12.8%,而在其他距离单元则不存在干扰的影响。

其次,我们对同频异步干扰情况进行仿真分

析。在同频异步干扰情况下，两部雷达重复周期刚好参差 τ_A 。图 4(a)给出一个 CPI 处理周期内第 1,2,3 和 64 个脉冲的回波信号，从中可以看出干扰脉冲之间刚好彼此错开，积累后干扰脉冲能量被平均到每一个多普勒通道，因此干扰信号功率会下降。图 4(b)和图 4(c)分别给出了积累后各多普勒通道的干扰功率，由于雷达 A 的同频异步干扰使得噪声基底抬高了 1.74 dB 左右，这与前面的理论分析结果相一致。

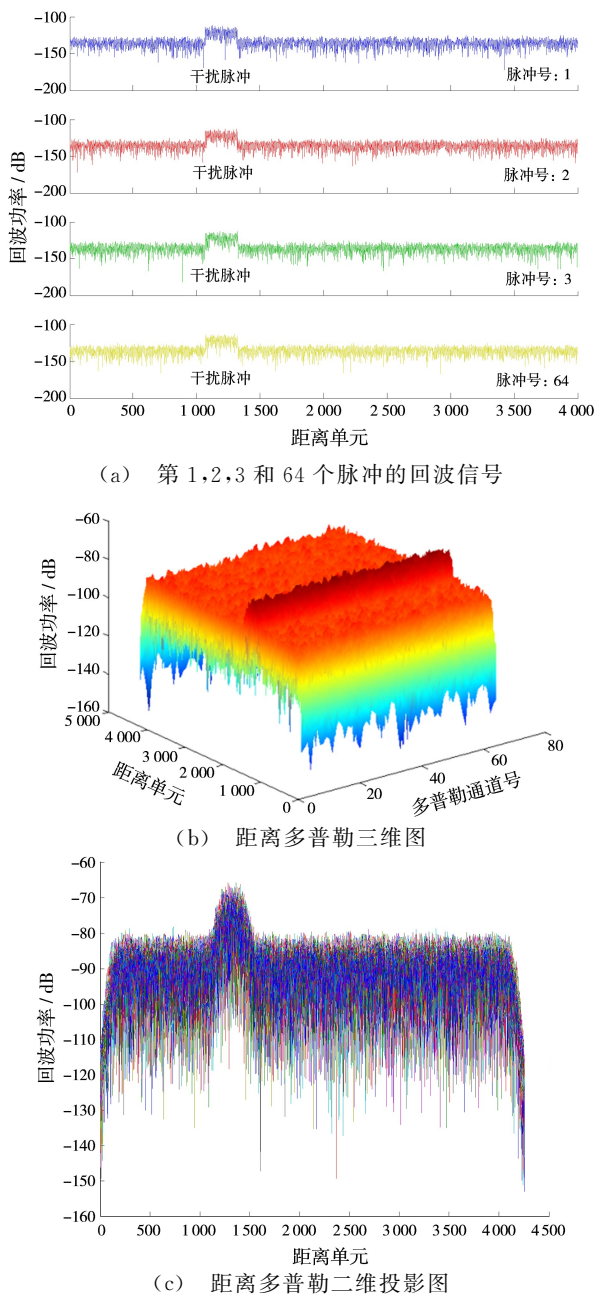


图 3 同频同步干扰情况下($f_A = f_B$ 时)各脉冲回波信号及相参积累后各多普勒通道的回波信号功率

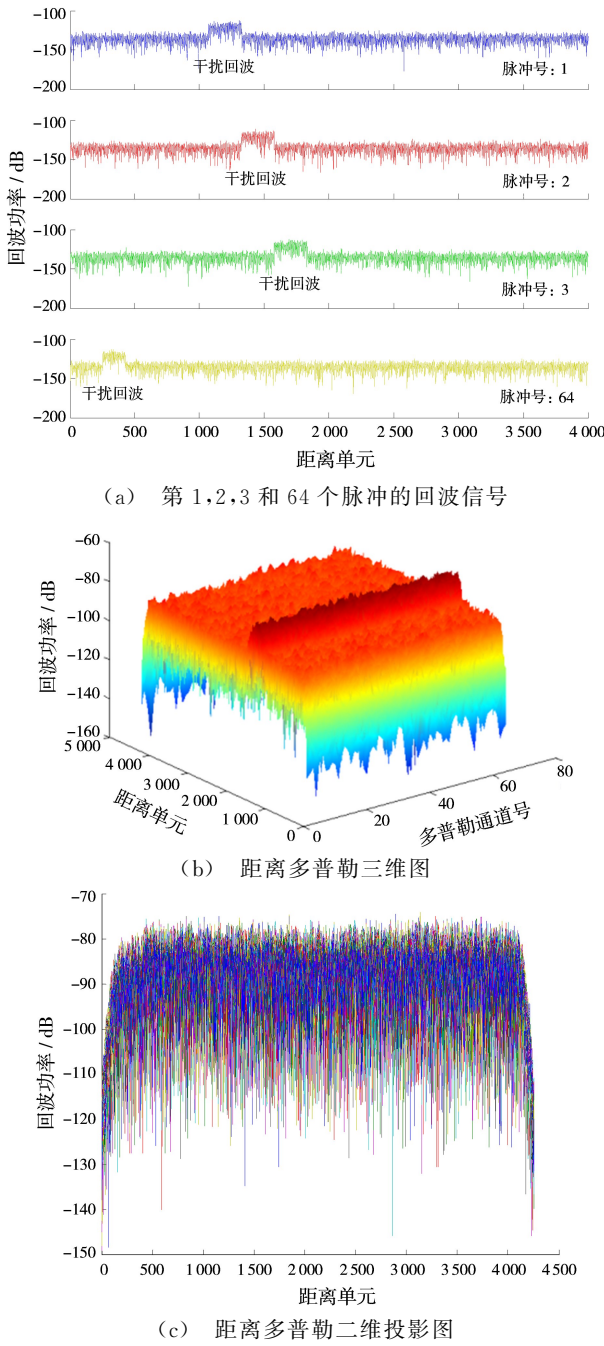


图 4 同频异步干扰情况下($\frac{1}{f_B} = \frac{1}{f_A} + \tau$ 时)各脉冲回波信号及相参积累后各多普勒通道的回波信号功率

3 结束语

在未来战场环境中，电磁环境错综复杂，瞬息万变，在某空域内同时参与空情保障的雷达也越来越多。因此，同频干扰是实现复杂电磁环境条件下目标检测和跟踪需要解决的一个严重现实问题。本论文对脉冲多普勒体制雷达同频干扰问题

进行了理论分析,建立脉冲多普勒体制雷达同频干扰分析模型,并针对两部雷达两种特殊情况进行举例分析,同时,依据雷达参数进行仿真分析,仿真结果证实了理论模型的准确性。

参考文献:

- [1] 陈永光,李修和,沈阳. 组网雷达作战能力分析与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 向龙,丁建江,周芬. 雷达组网抗复合干扰能力动态评估研究[J]. 雷达科学与技术,2010,8(3):209-213.
XIANG Long, DING Jian-jiang, ZHOU Fen. Research on Dynamic Evaluation of Anti Complex Blanking Jamming of Radar Netted System[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(3): 209-213. (in Chinese)
- [3] 李飞,赵洪立,郑恒. 基于FM广播的无源探测系统干扰抑制研究[J]. 雷达科学与技术,2010,8(1):1-6.

(上接第436页)

- Signal Processing, 2011, 59(1):160-171.
- [9] SEBERRY J, FINLAYSON K, ADAMS S S. The Theory of Quaternion Orthogonal Designs[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(1):256-265.
- [10] TOOK C C, MANDIC D P. Study of the Quaternion LMS and Four-Channel LMS Algorithm[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, [S.l.]:[s.n.], 2009:3109-3112.
- [11] SEBASTIAN M, NICOLAS L B. Quaternion-MUSIC for Vector-Sensor Array Processing[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(4):1218-1229.
- [12] 李京书,陶建武. 信号DOA和极化信息联合估计的降维四元数MUSIC方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1):106-111.

(上接第440页)

- //第15届全国信息存储技术学术会议论文集,北京:中国计算机学会信息存储技术专业委员会,2008:352-356.
- [3] Texas Instruments. TMS320C66X DSP CPU and Instruction Set[M]. Dallas:Texas Instruments Incorporated, 2010.
- [4] Texas Instruments. TMS320C66X DSP CorePac User Guide[M]. Dallas:Texas Instruments Incorporated, 2011.
- [5] 王怡然,常文革,田海山. Rapidio技术在高速信号处理系统中的应用[J]. 雷达科学与技术,2013,11(4):390-394.

LI Fei, ZHAO Hong-li, ZHENG Heng. Research on Jamming Suppression in Passive Detection System Based on FM Broadcast[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(1):1-6. (in Chinese)

- [4] 李潮. 复杂电磁环境下雷达同频干扰及对策[J]. 电子对抗, 2011(1):45-48.
- [5] 刘刚. 同频干扰产生机理分析及解决方法[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(3):17-19.
- [6] SKOLNIK M I. Introduction to Radar Systems(3rd ed)[M]. New York:McGraw-Hill, 2001.

作者简介:



王健男,1985年生于安徽省安庆市,2011年毕业于中科院上海技术物理研究所,获理学博士学位,现为中国电子科技集团公司第三十八研究所工程师,主要从事雷达总体设计和系统仿真研究工作。E-mail:wj_8509@163.com

- [13] 李建峰,张小飞,汪飞. 基于四元数的Root-MUSIC的双基地MIMO雷达中角度估计算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2):300-304.
- [14] 虞飞,陶建武,陈诚. 鲁棒的四元数空间平滑算法[J]. 信号处理, 2011, 27(9):1352-1358.
- [15] 武思军,张锦中. 基于协方差矩阵的空间平滑解相干算法[J]. 应用科技, 2005, 32(5):7-9.

作者简介:



刘芳女,1989年出生,湖南人,现为电子科技大学电子工程学院相控阵与自适应处理团队硕士研究生,主要研究方向为阵列信号处理。E-mail:dafangr@gmail.com

- [6] 柯明君,张军,涂丹. 基于DM6446的5/3小波变换优化方法[J]. 微计算机信息, 2009, 25(7-2):107-109.

作者简介:



方志红男,1973年出生,安徽宿松人,研究员,主要研究方向为雷达信号处理。E-mail:www_sar@126.com

常越男,1986年出生,陕西西安人,主要研究方向为雷达信号处理。