

制导武器中频率步进雷达的几项关键技术

Key Techniques of Stepped Frequency Radar in Guidance Weapon

胡秀娟/HU Xiu-juan¹, 邓甲昊/DENG Jia-hao¹, 潘曙光/PAN Shu-guang^{1,2}, 桑会平/SANG Hui-ping¹

1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081
2. 河北工业大学电气及自动化学院, 天津 300130

1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. School of Electrics and Automatics Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

[摘要] 频率步进雷达作为一种高分辨率雷达,在现代战争中发挥着举足轻重的作用。在简要分析频率步进雷达原理和存在问题的基础上,重点讨论了针对这些问题出现的不同解决方法以及新取得的成果,进而总结了频率步进雷达技术在武器工业领域的应用及其发展趋势。

[关键词] 频率步进雷达,制导技术,目标探测,成像技术,速度补偿,恒虚警检测

[中图分类号] TJ43, TN95

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)11-0004-04

Abstract: Stepped frequency radar is a kind of high resolution radar. It plays an important role in modern wars. The operation principle of stepped radar and its existent problems are analyzed. The different methods of solving the existent problems and the obtained results are introduced. Furthermore the application and developing trends of stepped frequency radar technique are summarized.

Key Words: stepped frequency radar, guidance technique, target detection, imaging technique, velocity compensation, CFAR detection

CLC Numbers: TJ43, TN95

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)11-0004-04

1 引言

现代高技术战争将围绕信息的搜集、处理、分发、防护而展开,信息化战争成为高技术战争的基本形态,夺取和保持制信息权成为作战的中心和焦点。而获取信息是雷达工作的首要任务,因此雷达在精确制导武器系统中发挥着重要作用。精确制导武器是高技术局部战争的基本打击手段和主攻武器^[1]。例如:在阿富汗战争中,美军共投掷各类弹药 2.2 万余枚,其中精确制导弹药 1.3 万多枚,使用比例由海湾战争的 9%、科索沃战争的 35% 大幅上升到此次战争的 60%,并创造了一次打击任务在 20 min 内投掷 100 枚联合直接攻击弹药的历史纪录。频率步进雷达作为一种高分辨率雷达应用于制导武器中,为信息的获取提供了一条有效途径。

频率步进雷达信号是一种重要的距离高分辨率雷达信号,它采用发射一串载频线性跳变的雷达脉冲,再通过对脉冲回波的 IFFT 处理获得合成距离高分辨的效果^[2]。这种信号可以在获得高分辨率的同时降低对数字信号处理机瞬时带宽的要求,因此近年来受到广泛的关注。

2 频率步进雷达系统与技术特征分析

2.1 频率步进雷达系统

频率步进信号的发射波形如图 1 所示, Δf 为相邻脉冲间的频率步进值, N 为频率步进数, f_0 为载频起始频率^[2]。

频率步进的发射信号为

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - kT_r - T_1/2}{T_1}\right) \cdot \exp[-j2\pi(f_0 + k\Delta f)t] \quad (1)$$

$$\text{rect}(t, S) = \begin{cases} 1, & -T_1/2 < t < T_1/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_r ——脉冲重复周期, T_1 ——发射脉冲宽度, C ——电磁波速。回波信号与本振信号混频后得到

$$\bar{y}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - kT_r - T_1/2 - 2R/C}{T_1}\right) \cdot \exp[-j2\pi(f_0 + k\Delta f)2R/C] \quad (3)$$

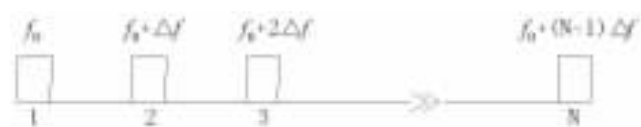


图 1 频率步进信号波形

收稿日期: 2005-08-22

作者简介: 胡秀娟,女,北京市中关村南大街 5 号北京理工大学机电工程学院,博士生,主要研究方向为中近程目标探测和雷达信号处理;E-mail: huxiujuan311@163.com

邓甲昊(通讯作者),男,北京理工大学机电工程学院,教授,主要研究方向为中近程目标探测与信号处理及感知与自适应控制;E-mail: bitdjh@sohu.com

频率步进雷达系统组成框图如图 2 所示。在发射端,与传统的相参雷达相似,发射信号由射频稳定本机振荡器和中频相干振荡器混频得到。但是,与传统的相参雷达不同的是,其间由频率综合器产生的频率步进量先与中频相干振荡器混频得到中频频率,然后再与射频稳定本机振荡器混频,最后得到发射信号。接收端处理是发射端处理的逆过程,同样经过射频、步进、中频。中频放大器的作用实质上相当于对每个脉冲包络的匹配滤波。相位探测器的输出是正交的视频信号,分为 I 路和 Q 路。每个发射脉冲的回波经 A/D 采样后存储起来,直到第 N 个发射脉冲的回波采样完毕,然后进行下一步的处理。

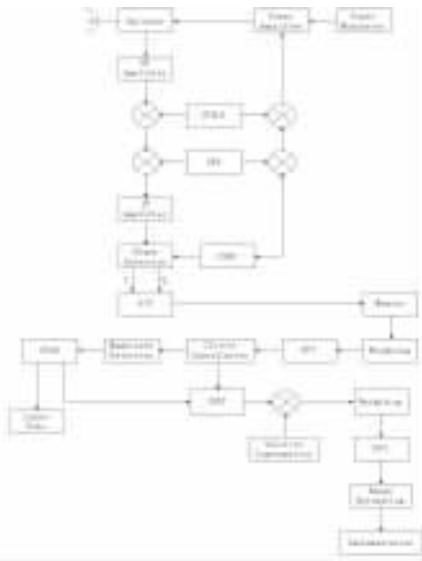


图 2 频率步进雷达系统组成框图

2.2 频率步进雷达的模糊函数

理想的模糊函数图在原有单一的峰值,除原点外的其它坐标点函数值趋近于无穷小。如图 3 所示^[3],单一的峰值消除了任何模糊。因原点附近的函数值趋近于无穷小,故消除了距离和速度耦合问题,可同时获得回波多普勒频率和时延的高分辨率。但是这些优点成立的条件是苛刻的,不仅模糊函数的最大值必须等于 $(2E)^2$,而且模糊函数曲面下的体积等于常数 $(2E)^2$,其中 E 为回波信号的能量。因此实际应用波形的模糊函数只是近于理想状态,如图 4 所示。如果使模糊函数在原点处的曲线沿多普勒轴和时延轴展宽,则其不能满足精度和分辨率的要求。如果使单一峰值处的曲面过窄,为了保证曲面下的体积不变,则必然在原点外的其它坐标点出现峰值,从而产生模糊。因此,在波形设计中,不能同时满足精度和模糊的要求。

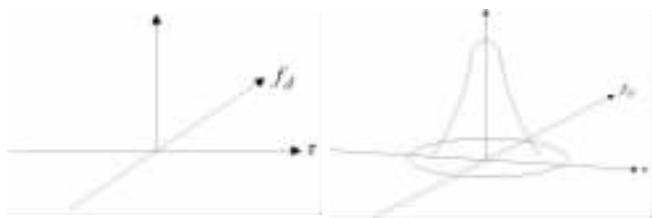


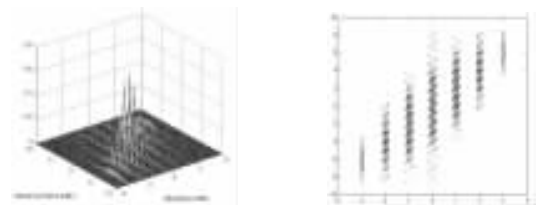
图 3 理想的模糊函数图

图 4 近似理想的模糊函数图

在设计雷达发射波形时,波形需满足如下需求:①易实现探测;②测量精度高;③高分辨率;④低模糊度;⑤杂波抑制能力强^[4]。模糊函数图可以用于估计雷达发射波形的上述性能。模糊函数的最大值表征了雷达的探测能力,但是,在仿真时,我们通常

将模糊函数的最大值归一化,因此模糊函数图很少用来评价雷达的探测能力。测距和测速的精度可以通过模糊函数图原点处的沿多普勒频率轴和时延轴的曲面宽度来衡量,宽度小说明测量精度越高,反之则越差。同时,分辨率的高低也与模糊函数图原点处的曲面的宽度有关。为了使雷达能够分辨出相距很近的 2 个目标,要求原点处的曲面较窄并且孤立与其它峰,而且原点处的峰值要高于其它峰值。如果一个波形具有好的分辨率,那么它也具有高的测量精度,反之未必成立。由此可见,模糊函数图除原点外的其它峰值的出现可导致目标参数测量模糊。模糊函数图还可以用来衡量所设计波形抑制杂波的能力。如果要求发射波形必须具有好的抑制杂波的能力,则其模糊函数图应在杂波区很少或没有响应。

频率步进雷达信号的模糊函数图如图 5 所示,由该图可看出频率步进雷达信号存在距离-速度耦合问题,具有高的距离分辨率,其速度分辨率与传统的脉冲雷达相似。



(a) 三维视图

(b) 等高线视图

图 5 频率步进雷达信号的模糊函数图 ($N=4, \Delta f=2, T=2, T_r=1^{[5]}$)

3 频率步进雷达技术的进展和成果

3.1 成像技术的进展和成果

频率步进雷达信号通过相应的信号处理可使其目标的一维距离像在距离域上细致地反映出目标的几何形状、分布、数目等特征。因此,雷达目标一维距离像的成像方法是频率步进雷达的关键技术之一。目前,频率步进雷达的一维距离像成像方法有 Chirp-z 变换法、IFFT 法、MUSIC 法、小波变换法、超分辨率估计法、双谱变换法、遗传算法等。下面简要讨论 3 种主要方法。

3.1.1 IFFT 法

IFFT 法是最早提出的频率步进雷达一维距离像成像方法,它伴随着频率步进雷达理论而产生。频率步进雷达 IFFT 法一维距离像成像过程是:发射机发射一系列 n 个脉宽为 T 、载频步长为 Δf 的脉冲串,各载频分别为 $f_i = f_0 + i\Delta f$,其中 $i=0, \dots, n-1$,这 $(n+1)$ 个脉冲的步进总宽度为 $n\Delta f$,通过对正交 I、Q 双通道的目标回波信号进行采样,获取目标的一系列回波幅度和相位数据,然后对采样数据作 IFFT,即可获得目标的一维距离像。例如:当 $n=256, f_0=3\ 000\ \text{MHz}, \Delta f=300\ \text{kHz}, T_r=7\ \mu\text{s}, v=200\ \text{m/s}, R_0=1\ 000\ \text{m}$ 时,最小距离分辨率为 $\Delta r = \frac{c}{2N\Delta f} = 6\ \text{m}^{[6]}$ 。存在 3 个目标,第一个目标与第二个目标相距 3 m,第二个目标与第三个目标相距 12 m,其仿真结果如图 6 所示。

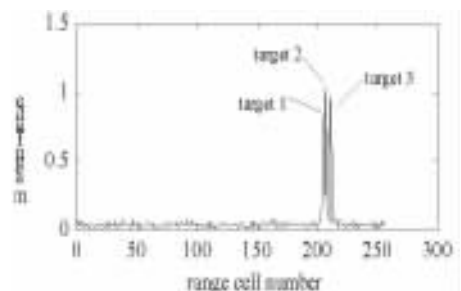


图 6 IFFT 法仿真结果

虽然 IFFT 成像方法比较成熟,但它给后续信号处理带来了许多问题,如:通常参数选取总是使得 IFFT 处理结果有一定冗余,这会造成目标距离走动并产生虚假目标^[7,8]。当采样时刻不是 $1/\Delta f$ 的整数倍时,通过 IFFT 处理所生成距离像发生循环移位,从而改变了距离像上各散射点的相对位置。对每组采样点所成的多幅距离像而言,由于各幅循环移动程度不同,使距离像拼接算法复杂化^[9]。因此,继 IFFT 法之后出现了许多新理论、新算法。

3.1.2 MUSIC 法

因频率步进雷达目标回波信号的相位具有 Pisarenko 谐波分解的性质,故频率步进雷达目标回波信号的超分辨率处理可以采用 Pisarenko 谐波分解法。由于 Pisarenko 谐波分解实质上是一种噪声子空间法,其中最具代表性的是 MUSIC 法(多重信号分类法-Multiple Signal Classification)。利用 MUSIC 法实现一维距离像的具体过程是:利用 MUSIC 算法估计出 AR 模型的参数,然后根据估计出的 AR 模型参数计算该模型的功率谱密度。将 MUSIC 算法用于频率步进雷达回波信号高分辨处理时,由于 AR 模型为全极点模型,所以目标回波信号中的所有谐振极点在功率谱上的不同位置处出现峰值^[10,11]。

因 MUSIC 法首先需要估计出相关的参数,而 IFFT 无需估计任何参数,故 MUSIC 法属于参数法,而 IFFT 法属于非参数法。大量文献中的仿真结果表明 MUSIC 法比 IFFT 法可得到精度更高的一维距离像,但处理速度却低于 IFFT 法。

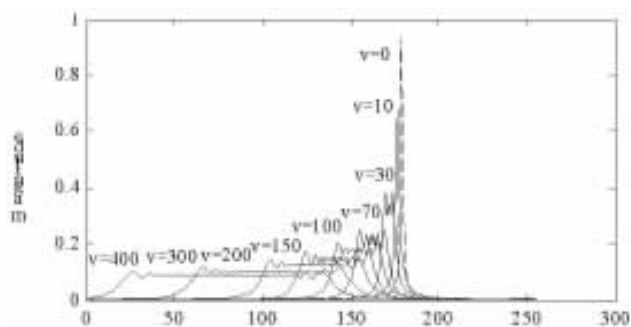
3.1.3 小波变换法

小波变换理论出现在 20 世纪 80 年代,之后在许多工程领域得到了广泛应用。据报道,在 90 年代,国外学者就开始研究如何将小波变换理论应用于频率步进雷达成像。近年来,国内学者针对这一领域也纷纷展开了研究并取得了初步的成果。

小波变换具有良好的时间-频率局域性和逼近性,它可以用不同尺度或分辨率来观察信号,可将任一信号分解到时间-频率分辨率不同的一族函数基中。在频率步进雷达信号处理中,采用小波变换法成像不但能够反映目标的粗略结构,而且能够反映目标多散射中心的精细结构^[12,13],因此,近年来小波变换在频率步进雷达信号处理中得到了广泛研究。

3.2 频率步进雷达速度补偿技术的进展和成果

与传统的固定频率的脉冲雷达相比,频率步进雷达可获得高的距离分辨率,同时降低了接收机的瞬时带宽和 A/D 采样率。从前面的分析可知,频率步进雷达的距离高分辨是通过 N 个频率步进脉冲回波的相参处理得到的。而相参处理就是对 N 个脉冲回波做 IDFT,当雷达和目标之间没有相对运动时,IDFT 处理相当于匹配滤波器。反之,相对径向运动将导致接收信号的非线性相移。此时,IDFT 处理与接收信号失配,致使输出距离像变形,如图 7 所示。为了消除距离-速度耦合问题,就必须对回波进行速度补偿。



$n=256, f_0=3\ 000\ \text{MHz}, \Delta f=20.0\ \text{MHz}, T_r=18\ \mu\text{s}, R_0=2\ 000\ \text{m}$

图 7 雷达平台与目标相对速度对回波信号的影响

近年来出现了许多用于频率步进雷达速度补偿的算法,归纳如下^[14-17]。

1) 频域互相关法:对 IFFT 之前相邻两帧的回波求互相关,根据相关输出的相位估计目标运动速度。此方法精度高、计算量小,但由于不模糊速度小,只适用于慢速目标。

2) 时域互相关法:利用两帧之间对应脉冲的相关,求出目标在两帧之间的距离走动,进而利用走动距离和目标速度之间的关系估计目标速度。

3) 最小熵值法:是一种闭环迭代算法,将衡量随机变量不确定性的熵引申用于衡量一个信号的能量沿其参数轴的分散程度,并定义一个波形熵,在速度或加速度轴上搜索波形熵的全局最小值对应的运动参数值即是目标的运动参数。此方法实时性较差,且精度与信噪比成反比。

4) 频率步进脉冲“组”串法:在每一个频点上发射一组脉冲,通过脉组之内的 FFT 处理获得目标速度,通过脉组之间的 IFFT 处理获得高距离分辨率的效果。

5) 正负双向调频和随机跳频方法:从模糊函数的角度出发,通过特殊的信号设计方法,使其模糊函数具有近似图钉形状,但此方法实现难度较大。

6) 有附加测速信息的运动补偿法:在能够不断获得目标速度信息的条件下,在 IFFT 处理之前,先把目标运动的多普勒频率在相位中减掉,然后通过一个简单的乘法运算来实现。该方法比较简单,但前提是多普勒频率要测得准确。

7) 脉冲多普勒测速方法:该方法是在频率步进工作过程中加入脉冲多普勒测速,以获得目标的速度估计。

3.3 恒虚警检测技术的发展

本文所研究的频率步进雷达用于弹载下视的条件下,因此由不同地物回波所形成的杂波强度和分布情况极为复杂。为了在如此复杂的杂波环境中检测出所关心的目标回波,要求频率步进雷达必须采用某种 CFAR 处理技术,以便在杂波环境变化时,防止雷达的虚警概率发生太大的变化,同时保证一定的检测概率。

恒虚警(CFAR, Constant False Alarm Ratio)处理主要是以杂波分布类型为基础的参量 CFAR 处理,大量的理论分析和实验研究表明,适用于各类杂波环境的分布类型主要有单参数的瑞利(Rayleigh)分布和双参数的韦布尔(Weibull)分布及对数-正态(Log-normal)分布。目前应用范围最广、实用性较强的 CFAR 处理方法有:基于 Rayleigh 分布杂波模型的单元平均类 CFAR;顺序统计类 OS-CFAR;采用自动筛选技术的 GOS 类 CFAR;基于 Weibull 分布杂波模型的 OS-CFAR;基于 Weibull 或 Log-normal 分布杂波模型的 LOG-t CFAR、MLH CFAR、BLUE CFAR 等。

虽然恒虚警检测方法已广泛地应用于雷达技术中,但是将恒虚警检测技术应用于频率步进雷达在国内还鲜见报道,而国外已有了相关报道,详细内容见参考文献^[18]。

4 频率步进雷达在武器工业中的应用及发展趋势分析

随着雷达技术的发展,现代雷达已从简单的目标测距和定位功能向着多功能方向发展,提高雷达分辨率是现代雷达的一个重要发展方向。因此频率步进雷达已成为近年来高分辨率雷达体制的研究热点之一。频率步进雷达原理在 20 世纪 60 年代末就有报道,由于当时受频率综合器水平的限制,频率步进雷达技术未被雷达系统真正使用。随着微波技术、大规模集成技术和数字信号处理技术的发展,现代频率综合硬件的研制成功,使频率步进雷达的真正应用成为可能。

随着频率步进雷达技术的发展,其信号检测与处理技术也相应得到完善。由于频率步进雷达的径向分辨单元远远小于目标尺寸,从距离域上可以细致地反映目标的几何形状及其结构特征。因此,频率步进雷达已广泛地用于成像。美国的麻省理工大学和

圣地亚哥的 NOSC 研究中心在频率步进雷达技术研究方面已取得了丰硕的果实。在实际应用中, 频率步进雷达技术已应用于 SAR(合成孔径雷达)和 ISAR(逆合成孔径雷达)等不同用途的雷达中。如:由 Raytheon 公司研制的 TMD/NMD-GBR/XBR(如图 8 所示),GBR(Ground Based Radar)和 XBR(X-Band Radar)是 NMD(国家导弹防御系统)的主力火控雷达,可提供对空监视,目标获取、跟踪、识别、分类、弹道估计,火控支持和杀伤评估等功能。

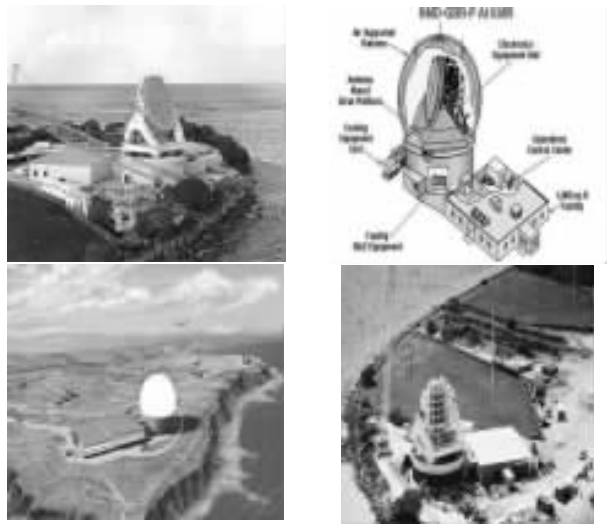


图 8 TMD/NMD-GBR/XBR

5 结论

频率步进雷达技术是高分辨率雷达技术的发展趋势,与脉冲压缩雷达相比,它的波形设计灵活,且对硬件的要求不苛刻,大多数情况下可适应雷达工作要求。随着信息技术的发展,其理论体系的不断完善,新的信号处理算法的不断涌现,将为频率步进雷达提供广阔的应用前景。

参考文献(References)

- [1] 刘峥,张守宏.步进频率雷达在精确制导武器中的应用[J].制导与引信,2002. 23(3)
- [2] Wehner D R. High Resolution Radar (2ed)[M]. Artech House, 1995. 431
- [3] Merrill I. Skolnik. Introduction to Radar Systems [M]. Second Edition, McGraw-Hill, Inc. 1980. 192
- [4] Gill G S, Huang Jen-Chih. Analysis of Step Frequency Radar

Using Ambiguity Function [J]. In: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 1996,2 845~2 850

- [5] Gill, G.S, Jen-Chih Huang. The Ambiguity Function of the Step Frequency Radar Signal Processor Radar[C]. In: CIE International Conference. 1996. 375~380
- [6] Gill G S. Step frequency waveform design and processing for detection of moving target in clutter [C]. In: IEEE International Radar Conference. 1996. 573~578
- [7] 李昉,龙腾. 步进频率雷达目标去冗余算法[J]. 电子学报, 2000, (6)
- [8] Wilkinson A J, Lord R T, Inggs M R. Stepped-frequency Processing by Reconstruction of Target Reflectivity Spectrum[A]. South African Symposium[C]. 1998. 101~104
- [9] 周剑雄,赵宏钟,付强. 频率步进雷达距离像解模糊算法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 25(9)
- [10] 李跃华,李兴国. MUSIC 法用于频率步进毫米波雷达目标回波信号分析[J]. 电子测量与仪器学报, 1999, 13(2)
- [11] Chakrabarti S, Kannagaratnam P, Gogineni P. Model-based technique for super resolution and enhanced target characterization using a step-frequency radar: a simulation study [C]. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96'. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.' 1996. 1 867~1 869
- [12] Le-Tien T, Nguyen D T. Coincident Detection Approach Based on Scale-invariance Characteristic of Scattering Locations in Wavelet-based Range-scale Domain [J]. Electronics Letters, 1998, 34(17): 1 691~1 693
- [13] Le-Tien T, Nguyen D T. Performance of Behaviour of Scattering Mechanisms in Time-scale Domain Against Random Noise For Centimetre Wave Radar [J]. Electronics Letters, 1997, 33(22):1 900~1 901
- [14] Lord R T, Inggs M R. High Resolution SAR Processing Using Stepped-frequencies, Geoscience and Remote Sensing [C]. In: IGARSS '97'. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development. 1997, 490~492
- [15] 刘静,李兴国. 毫米波高分辨率雷达运动补偿研究 [J]. 现代雷达, 2004, 26(7)
- [16] 宋玉霞. 一种调频步进雷达目标的运动补偿方法 [J]. 电讯技术, 2004, 25(5)
- [17] Niu Tao, Chen Weidong. Radial Motion Estimation for Pulse Stepped-frequency Radar [C]. In: Signal Processing, 2004. Proceedings. ICSP '04'. 2004 7th International Conference 2004. 1 961~1 964
- [18] Yamaguchi H, Kajiwara A, Hayashi S, Saiga R. Target Detection in Ground Clutter with Stepped Frequency CFAR Detector at Millimeter-wave[C]. In: Radar, 2001 CIE International Conference. 2001. 363 ~ 367

(责任编辑 胡春华)

·科技智力游戏·

好玩的数学——棋盘上的数学

下棋是最古老,也是拥有最广泛的爱好者的游戏,其形式也多种多样。据考证,我国的围棋是世界上历史最悠久的一种棋类。能和围棋相媲美的国际象棋则起源于印度人在 7 世纪左右所发明的游戏“恰多兰加”(Chaturanga),最初是由 4 个人分坐 4 个方向对弈。

人们从国际象棋演绎出了许多有趣的数学问题,其中最著名的一个是“高斯八皇后问题”。下面我们给出的问题也是跟皇后有关的。在国际象棋中,皇后是一个威力很大的棋子。她可以“横冲直撞”(在水平或垂直方向上走任意步数),也可以“斜刺冲杀”(在 $\pm 45^\circ$ 对角线上走任意步数)。因此,在棋盘上只要布 5 个皇后,就可以控制整个棋盘,也就是说任意子如果被放在棋盘的任意位置,都会被这 5 个皇后中的 1 个吃掉(当然,这 5 个皇后要有适当的布局)。现在我们思考一个相反的问题:如何在棋盘上布 8 个皇后,使她们的控制范围最小?也就是如何使免受这 8 个皇后攻击的自由空格最多。

上期“猜数字哑谜”答案:

1) 复原后的算式如右图。

2) 对于 $USA+USSR=PEACE$, 我们首先注意到,这是 3 位数加 4 位数,和是 5 位数,因此 USSR 一定是 9 000 多。进而可知,USA 一定是 900 多,而 PEACE 是 1 万零几百。这样,就确定了 $P=1, U=9, E=0$ 。其次,根据和的末位 $E=0$,可知两个加数的末位 A 和 R 之和必为 10。由于 1 和 9 已分别被 P 和 U 所代表,因而 A 和 R 只有 4, 6, 3, 7, 2, 8 这 3 种组合可能。由于和的百位上也是 A, 可逐一取 $A=8, 7, 6, 4, 3, 2$ 来试探,得到 $A=2, S=3, C=7$ 。最终确定算式为 $932+9338=10270$ 。

$$\begin{array}{r} 20809 \\ 124 \overline{) 10020316} \\ \underline{992} \\ 1003 \\ \underline{992} \\ 1116 \\ \underline{1116} \\ 0000 \end{array}$$

(供稿 吴鹤龄 责任编辑 黄永明)