

防空相控阵雷达转角控制策略

唐晓兵^{1,2}, 罗石麟¹, 孙国基², 卫军胡²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:针对防空相控阵雷达转角控制策略对防空导弹作战效能的重要作用,分析了防空相控阵雷达天线阵面转角对空中目标射击条件的影响,给出了防空战术指控中心判断下属火力单元是否需要实施转角控制的判断方法,结合防空目标分配过程建立了相控阵雷达责任方向转角控制策略优化算法。计算机仿真实验结果表明,对防空相控阵雷达天线阵面实施适当的转角控制策略,可较好地提高防空系统的作战效能。

关键词:相控阵雷达;目标分配;防空导弹系统;转角控制策略

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0021-04

现代防空导弹的照射制导雷达很多都是快速电扫描的多功能平面相控阵雷达,在防空作战中,相控阵雷达天线阵面一般按作战预案在方位上指向某一主要来袭方向,而高低角为一固定角度^[1-3]。在相控阵天线阵面不动的情况下,受天线阵元间距的限制,单阵面相控阵雷达天线波束在方位上最大的相控扫描范围一般小于120°,而实战中空袭目标可能从各个方向来袭,为了增大相控阵雷达的方位覆盖范围,一种经济而有效的方法就是将单阵面相控阵雷达安装在高精度的机械转动平台上,从而可以实现全方位覆盖^[2-5]。为了充分发挥相控阵雷达的功能,必须对雷达资源进行优化管理和调度,主要是对雷达波束指向的控制和对时间的管理^[5-10]。在防空作战中,考虑对防空导弹火力单元目标跟踪和火力优化分配的需要,应当结合防空目标分配的过程来确定在适当的时机调转相控阵照射制导雷达天线阵面的方位指向,以提高防空系统的整体作战效能。

1 相控阵雷达转角对目标射击条件的影响分析

在防空作战中,各防空导弹火力单元的相控阵雷达天线阵面的方位指向受敌情、防空部署和作战预案的影响。当敌情变化时,为了提高搜索、跟踪效果,必须对空袭态势进行综合分析,而空袭目标的航路捷径是其中需要考虑的最重要的因素之一。为了分析目标航路捷径大小与相控阵雷达转角控制的关系,假设空袭目标为临近直飞的,在典型的航路捷径下,当相控阵雷达阵面在方位角的指向相对于目标来袭方向采用不同的转角时,相控阵雷达威力范围如图1所示。

在图中,分别用点画线、虚线和加粗黑线表示阵面转角 θ 为10°、20°、35°时其覆盖范围的变化, L 表示目标航路上指定的纵向距离 S 上的点到雷达波束扇面中心轴的距离,其变化

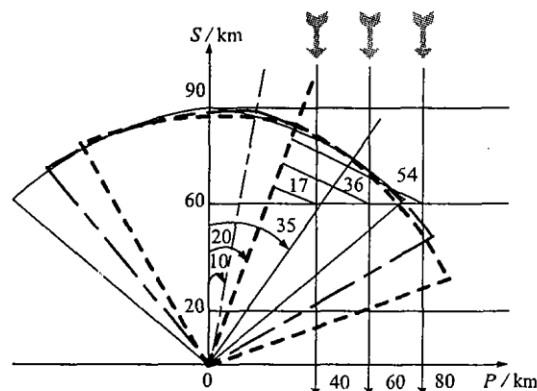


图1 相控阵雷达转角影响示意图

收稿日期:2006-10-24

基金项目:西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室开放课题(200503)

作者简介:唐晓兵(1972-),男,四川广安人,讲师,博士生,主要从事系统建模与仿真研究;
罗石麟(1939-),男,湖南长沙人,教授,主要从事防空运筹学研究。

和大约数值分别如图1和表1所示(雷达波束扫描范围为 $\pm 45^\circ$),表1中负 L 值表示另一方向(左侧向)上到扇面中 λ 心的距离,粗斜体表示此时目标在火力单元的杀伤区之外。

由表1分析可知,对于不同航路捷径($P=40, 60, 80$ km)下直行临近的目标:①当纵向距离小(20 km)时,相控阵雷达大转角后才能有效射击目标;②当纵向距离中等(60 km)时,作适当的不同转角($10^\circ - 35^\circ$)后,均有机会进行有效射击;③当纵向距离太大(90 km)时,采用任何转角均不能进行有效射击。

不难看出,作大转角后,对中、小纵向距离上的目标均可改善射击条件,即对大多数目标能进行有效射击,具体地说(见表1),转角 20° 可解决对50%目标的有效射击,转角 35° ,则可解决 $5/6 \approx 83.3\%$ 的目标的有效射击;若此时不进行转角,便对多数情况不能进行射击。可见,当有相当大航路捷径进袭的目标时,宜采用较大转角措施,方能对多数情况下的目标进行有效射击,而小转角只对进袭方向改变小且航路捷径小的情况比较适用。

表1 相控阵雷达转角对 L 值的影响

L/km	$S = 20/\text{km}$			$S = 60/\text{km}$			$S = 90/\text{km}$		
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$
$\theta = 0^\circ$	40	60	80	40	60	80	40	60	80
$\theta = 10^\circ$	36	56	75	29	49	68	24	43	63
$\theta = 20^\circ$	31	50	68	17	36	55	07	26	44
$\theta = 35^\circ$	21	38	54	-2	15	31	-19	-2	14

2 战术指控中心对火力单元雷达转角时机的判断方法

一般地,当敌主要来袭方向有变化,某些火力单元相控阵雷达阵面需要转角时,上级战术指控中心应当给火力单元下达相控阵雷达天线作适当转角的指令。那么,如何判断战术指控中心是否需要向下属的各火力单元下达雷达转角控制命令呢?我们以空袭机群是否会通过防空作战区为主要考虑条件。设战术指控中心或火力单元在某一个扫描周期 j 内已测得 n 个目标点迹(在统一的北天东坐标系中): $(x_i(j), y_i(j), z_i(j))$, $i=1, 2, \dots, n$ 。其中战术指控中心从各火力单元获得的目标点迹可能还未来得及进行航迹对批,因此允许数个点迹表示的是同一个目标。

首先,求空袭目标群形廓

$$\begin{cases} x_{R1} = \max \{x_i(j), i=1, 2, \dots, n\} \\ x_{L1} = \min \{x_i(j), i=1, 2, \dots, n\} \\ z_{R1} = \max \{z_i(j), i=1, 2, \dots, n\} \\ z_{L1} = \min \{z_i(j), i=1, 2, \dots, n\} \end{cases}$$

对应于目标点迹: $(x_{R1}, z_{R1}), (x_{L1}, z_{L1}), (x_R, z_R), (x_L, z_L)$ 。

类似地,设各火力单元的平面坐标为 (x_k, z_k) , $k=1, 2, \dots, M$ (共 M 个火力单元),则同样计算得布势形廓为 $(x_{R2}, z_{R2}), (x_{L2}, z_{L2})$,对应于火力单元: $(x_{R2}, z'_{R2}), (x_{L2}, z'_{L2}), (x'_R, z'_{R2}), (x'_L, z'_{L2})$ 。若 $x_{R2} > x_{R1}, x_{L2} < x_{L1}, z_{R2} > z_{R1}, z_{L2} < z_{L1}$ 表明目标群形廓在战术指控中心的布势形廓之内,一般不必考虑转角问题。否则,计算空袭目标群的重心 (\bar{x}_j, \bar{z}_j) ($j=1, 2$)为 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(j), \bar{z}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i(j)$,其中 $j=1, 2$ 的重心值可取间隔为3个扫描周期的两个重心点,以提高判断目标群航迹的准确度。

由 (\bar{x}_j, \bar{z}_j) , ($j=1, 2$)可求得空袭机群的航向,从而可以建立直线方程 $l: \frac{1 - z_1}{z_2 - z_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$ 。计算 l 相对于各

火力单元的航路捷径 p_i 及目标群的纵向距离 d_i ,若所有 p_i 均超过最大航路捷径,则表明实际上不可射击;若存在多个火力单元,使 l 相对于它们的航路捷径均比较小,则无需下达转角命令;否则,若存在某个火力单元航路捷径及纵向距离均比较大,则对应的火力单元一般应下达转角命令。下达转角命令的时机应在进行有效射击之前 K s实施: $K = t_{cmd} + t_{slew} + t_{resp}$ 。其中, $t_{cmd}, t_{slew}, t_{resp}$ 分别表示命令下达所需时间、雷达转角所需时间和系统反应时间。

那么,哪些火力单元的相控阵雷达应进行转角,转多少为宜呢?对于第一个问题,应根据各火力单元按照同上方法的计算结果、作战预案及对敌情分析综合确定。对于第二个问题,根据上述量化分析可知,一般转角取 $20^\circ - 30^\circ$ 为宜。但具体应该转角多少,则应根据具体空袭和防空态势来确定。

3 目标分配过程中的转角控制策略

3.1 转角控制策略

由于相控阵雷达能同时跟踪多个目标,而各目标到达防空火力单元照射制导雷达作用范围的时间一般是不同的,在防空作战过程中,为了提高防空作战效能,必须对目标进行优化分配^[11-12]。在目标分配过程中,一般假设进入火力区的目标按直线飞行,考虑到分配给同一火力单元的不同目标必须能够同时被跟踪,而雷达在方位上的跟踪范围可以用一个以雷达站为原点的扇区来表示,因此判断目标能否在方位上被同时跟踪的简便方法是:判断目标当前坐标和预测的遭遇点是否在雷达的责任扇区内,若两点都在雷达责任扇区内,则该目标从当前点开始直到遭遇点的航迹可以认为都在雷达跟踪范围内。

在目标分配过程中,如果某火力单元已分配了 k 个目标,假设其当前坐标值为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, k$, 并假设这些点迹所形成的扇区起始方位角和终止方位角分别为 β_{begin} 和 β_{end} , 则该扇区中线的方位角为: $\beta_1 = (\beta_{begin} + \beta_{end})/2$ 。为了更好地跟踪这些目标,应当将雷达责任扇区的中线方位角设置为 β_1 , 而扇面的大小由雷达的波束扫描范围决定,用 S_1 表示当前责任扇区。

假设有一个新目标,坐标为 (x_i, y_i) , 预测其遭遇时间为 t_{meet} , 那么由该目标的当前坐标及其速度可外推遭遇点为 (x_{meet}, y_{meet}) , 同样,将已分配的 k 个目标外推到 t_{meet} 时刻的坐标为 $(x_{mi}, y_{mi}), i = 1, 2, \dots, k$ 。运用上面相同的方法,可以计算这些点迹所形成的扇区中线的方位角 β_2 。为了在 t_{meet} 时刻较好地跟踪这些目标,应当将该时刻的雷达责任扇区的中线调转为 β_2 , 用 S_2 表示新的责任扇区。

通过判断新目标的当前坐标点和预测的遭遇点是否分别在 S_1 和 S_2 内来确定其能否满足与已分配的目标同时被跟踪的条件,而天线方位角指向的调转可在 t_{meet} 时间内进行。

因此,对目标分配中雷达转角控制策略可描述如下:①设置各火力单元的初始雷达责任扇区中线方位角 $\beta_j (j = 1, 2, \dots, N)$, 扇面的大小由雷达波束扫描范围决定。②计算各目标相对于火力单元 j 的射击诸元,对满足射击条件的目标,预测其相对于火力单元 j 的遭遇时间和遭遇点。③计算已分配给火力单元 j 的所有目标当前点迹所形成的扇区中线方位角 β_{j1} , 并置 $\beta_j = \beta_{j1}$ 。④对准备分配给火力单元 j 的新目标,考察其当前坐标点是否在以 β_j 为中线的雷达责任扇区内。若不在,转⑤;否则,转⑥。⑤尝试建立能包含分配给火力单元 j 的所有目标的新责任扇区。若能建立,则设其中线方位角为 β_{j1} , 该新目标能与已分配的目标同时被雷达跟踪,转⑥;若不能建立,表明新目标不能与已分配的目标同时被雷达跟踪,转⑧。⑥将新目标与已分配给火力单元 j 的目标均外推至新目标的预测遭遇时刻的坐标,计算这些点迹所形成的扇区中线的方位角 β_2 。若新目标遭遇点在以 β_2 为中线的责任扇区内,则新目标能分配给火力单元 j , 转⑦;否则,新目标不能分配给火力单元 j , 转⑧。⑦置 $\beta_j = \beta_{j1}$, 对新目标作分配标记,转⑧。⑧若对火力单元 j , 还有满足射击条件的目标,则取下一个目标,转④;否则,考察下一个火力单元,转②。直至所有火力单元考察完毕,实施相应的转角控制,转下一周期。

3.2 仿真实验及结果分析

假设防空战术指控中心下属火力单元数分别为 5、9、12 共 3 种情况,待分配的目标数分别为 30、40、50、60 共 4 种情况,对火力单元相关参数和目标运动参数做初始设定后,通过计算机仿真程序对各种组合情况下不采取转角策略和采取转角策略分别进行仿真实验,目标分配结果如表 2 所示。

表 2 目标分配结果对比表

火力单元数	5				9				12			
	30	40	50	60	30	40	50	60	30	40	50	60
分配目标数(无转角策略)	6	7	7	8	9	10	10	11	10	12	12	13
分配目标数(转角策略)	14	14	15	14	18	18	19	18	24	24	24	25

从仿真实验的目标分配结果可以看出,采用转角控制策略后分配给火力单元的总目标数基本上是不采用转角控制策略时目标分配总数的两倍。仿真结果表明,对防空相控阵雷达采用适当的转角控制策略可以提高防空系统的整体作战效能。

4 结论

通过将单阵面相控阵雷达安装在机械转动平台(塔台)上,能够以较小的经济代价扩展相控阵雷达的视角范围,而有效地控制这类相控阵雷达天线指向对充分发挥雷达性能和满足任务需求非常重要。本文在分析相控阵雷达转角控制对目标射击条件影响的基础上,提出了一种防空战术指控中心决定各火力单元雷达是否需要转角的判断方法,并结合防空目标分配问题给出了一种防空导弹火力单元雷达方位转角控制策略,仿真结果表明,适当的转角控制策略可提高防空系统整体作战效能。

参考文献:

- [1] 陶新政,殷大虎. 地空导弹相控阵雷达[J]. 地空防空武器,2004,25(1):22-28.
- [2] 张光义,王德纯,华海根,等. 空间探测相控阵雷达[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [3] Brookner E. Phased array radars - past, present and future [A]. In: 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems & Technology Proceedings [C]. IEEE, 2000. 104-113.
- [4] Thomas W, Jeffrey. An Observer for Use With Mechanically - Steered Limited - Scan Phased Array Radars [A]. In: Proceedings of 1991 IEEE Radar Conference [C]. IEEE, 1991. 76-78.
- [5] Steven T Cummings, Kenneth Behar. Radar Resource Management for Mechanically Rotated, Electronically Scanned Phased Array Radars [A]. In: Proceedings of 1991 IEEE Radar Conference [C]. IEEE, 1991. 88-92.
- [6] Miranda S L C. Phased Array Radar Resource Management: a Comparison of Scheduling Algorithms [A]. In: Proceedings of 2004 IEEE Radar Conference [C]. IEEE, 2004. 79-84.
- [7] Watson R. Radar Resource Management Modeling [A]. In: Proceedings of RADAR 2002 [C]. IEE, 2002. 562-566.
- [8] Paul E Beny, David A B Fogg. On the Use of Entropy for Optimal Radar Resource Management and Control [A]. In: Proceedings of the International Radar Conference, 2003 [C]. IEEE, 2003. 572-577.
- [9] Sourav Ghosh, Jeffery Hansen, Ragunathan (Raj) Rajkumar, et al. Integrated Resource Management and Scheduling With Multi - Resource Constraints [A]. In: Proceedings of the 25th IEEE International Real - Time Systems Symposium (RTSS 2004) [C]. IEEE, 2004. 1-11.
- [10] Bill Gillespie, Evan Hughes, Mike Lewis. Scan Scheduling of Multi - Function Phased Array Radars Using Heuristic Techniques [A]. In: Proceedings of 2005 IEEE Radar Conference [C]. IEEE, 2005. 1-6.
- [11] 唐晓兵,罗石麟. 防空目标分配的三个层次浅析[A]. 军事运筹学会2003年会议论文集[C]. 北京:海潮出版社,2003. 124-126.
- [12] 邢清华,王颖龙,刘付显. 多型号武器的目标优化分配问题研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(1):22-25.

(编辑:田新华)

Research on Slew Control Strategy of Air Defense Phased Array Radars

TANG Xiao - bing^{1,2}, LUO Shi - lin¹, SUN Guo - ji², WEI Jun - hu²

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2 State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The slew control strategy of air defense phased array radars can affect the air defense missile system's operational effectiveness markedly. The effect on firing conditions of phased array radar by changing the pointing direction of phased array antenna in azimuth is analyzed, and an approach whether to put the slew control strategy into practice as well as a slew control method used in air defense target assignment is presented to achieve sufficient intercept performance. The method given in this paper is demonstrated by simulation application, the results show that the dynamic control of air defense phased array radar can significantly improve the operational effectiveness of the air defense system.

Key words: phased array radar; target assignment; air defense missile system; slew control strategy