

## 一种相控阵雷达新型搜索波形研究

郑志宽<sup>1</sup>, 何强<sup>1,2</sup>, 韩壮志<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军63961部队, 北京 100012)

**摘要:** 针对传统相控阵雷达搜索波形占用时间资源较大的问题, 在充分研究相控阵雷达工作方式以及具体分析传统分时发射不同重复周期脉冲的搜索方式基础上, 提出了一种新型的三频段搜索波形, 并给出了其参数选择原则和信号的时域频域形式。经实例分析, 证明这种信号可以有效节省搜索占用的时间资源, 并提高搜索性能。最后对一些尚待解决的问题进行了讨论。

**关键词:** 相控阵雷达; 搜索波形; 三频段信号

**中图分类号:** TN958.92

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2014)08-0087-04

## A Kind of New Searching Signal Waveform for Phased Array Radar

ZHENG Zhi-kuan<sup>1</sup>, HE Qiang<sup>1,2</sup>, HAN Zhuang-zhi<sup>1</sup>

(1. Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. No. 63961 Unit of PLA, Beijing 100012, China)

**Abstract:** To solve the problem that the conventional phased array radar waveform takes relative large amount of resources of time, we studied the working mode of phased array radar and the traditional timeshare transmitted pulses with different repetition periods. Based on which, a search method was proposed based on a novel three-band search waveform, the parameter selecting principles and signal forms in time domain and frequency domain were given. The analysis to an example shows that this kind of signal can effectively save the time and improve the search performance. Finally, some of the outstanding issues are discussed.

**Key words:** phased array radar; searching signal; three-band signal

### 0 引言

在现代复杂多变的电子战环境中, 依靠空间捷变的波束扫描能力和灵活高效的资源管理方式, 相控阵雷达在对付多目标、多干扰源以及对环境的自适应等方面均体现出传统机械扫描雷达无法比拟的优势。

快速发现目标是雷达搜索模式的主要功能, 相控阵雷达无惯性的波束扫描与灵活的时间管理能力为快速发现目标提供了硬件基础。但充分发掘硬件潜在能力, 需要对相控阵雷达系统搜索参数进行优化设计。

相控阵雷达作为现代电子技术和信息处理技术的产物, 具有传统机械雷达无法比拟的波束指向捷变能力和多样的波形选择能力<sup>[1]</sup>。同时, 相控阵雷达工作

参数自由度的增加, 也给雷达参数设定提出了更高的要求。搜索性能是相控阵雷达工作中的重要指标。在一定的搜索资源下, 相控阵雷达必须合理设定其工作参数, 使得雷达搜索性能达到最优。针对这一问题的研究文献较多: 文献[2]比较全面地介绍了实际应用中搜索性能优化涉及到的各方面问题; 文献[3]给出了简略搜索资源与雷达探测距离和搜索帧周期的关系式, 初步建立了搜索性能优化模型, 定性给出了搜索参数的设定准则; 文献[4]在文献[3]的基础上研究了如何设定波束驻留时间和搜索帧周期, 使得雷达对目标的积累探测距离最大。在上述研究工作中, 关注的优化参数主要是搜索波束驻留时间和搜索帧周期。文献[5]研究了虚警引起的时间消耗对搜索性能的影响。

然而, 这些研究全部是基于传统的分时发射不同重复周期的脉冲来进行目标搜索, 分时发射脉冲的方法虽然比较成熟, 但不可避免地会占用较大的时间资源, 如果设计一种波形, 可以在一个脉冲重复周期中完成对

收稿日期: 2013-09-02

修回日期: 2013-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51107147)

作者简介: 郑志宽(1988—), 男, 河北正定人, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

远、中、近各个距离短的目标搜索,必将大大节省时间资源,从而可以实现对更多目标的搜索和跟踪。

## 1 相控阵雷达工作方式

### 1.1 边搜索边跟踪工作方式

搜索工作方式可分为远、近不同探测范围内的搜索<sup>[2]</sup>。搜索时间表示为

$$t_s = K_p K_v N T, \quad (1)$$

式中: $K_p K_v$ 为相控阵雷达威力覆盖范围所需的波束数目; $N, T$ 为波束驻留数及时间。即,搜索工作方式、威力范围(量程)不同,搜索所需的时间及搜索周期也不同。

搜索过程中,如发现目标,还要进行目标截获和目标跟踪。搜索间隔时间为

$$t_{si} = t_s + t_\mu \quad (2)$$

其中, $t_\mu$ 为跟踪时间。即,在搜索过程中,跟踪目标的时间和数量会影响搜索和跟踪的数据率(跟踪采样率)。

### 1.2 跟踪加搜索(TAS)工作方式

假设每一个跟踪指向都用相同的跟踪驻留波束数及跟踪驻留时间( $N_i T_i$ ),则跟踪时间为

$$t_i = n_i N_i T_i \quad (3)$$

式中: $n_i$ 为跟踪目标批数; $N_i, T_i$ 为跟踪驻留波束数及跟踪驻留时间。即,跟踪数据率与跟踪的目标批数成反比,与波束的驻留时间成反比的关系。总的跟踪时间为

$$t_{ii} = (t_{si}/t_s) n_i N_i T_i \quad (4)$$

式中, $t_{ii}$ 为跟踪间隔时间。搜索间隔时间为

$$t_{si} = t_{ii} + t_s = t_s + (t_{si}/t_s) n_i N_i T_i \quad (5)$$

即,在雷达搜索周期内的跟踪总次数,与跟踪间隔时间成反比,与搜索间隔时间成正比。最大跟踪目标数为

$$n_i = \frac{(t_{si} - t_s) t_s}{t_{ii}} \frac{1}{N_i T_i} \quad (6)$$

可以看出,总的搜索时间 $t_s$ 越小,搜索间隔时间 $t_{si}$ 则越大,最大跟踪目标数目 $n_i$ 就随之增加。最小跟踪间隔时间 $t_{ii}$ 越大,则跟踪驻留波束数及跟踪驻留时间 $N_i, T_i$ 越小,最大跟踪目标的数目 $n_i$ 也越多<sup>[3-4]</sup>。

目标搜索数据更新率与搜索时间间隔成反比,即搜索范围越小,跟踪目标时间越短,跟踪批次越少,搜索周期就越短。当跟踪数据刷新周期已确定时,跟踪的目标批数和跟踪时间越少,则搜索数据的更新率就越高。

## 2 新型相控阵雷达搜索波形

### 2.1 传统的搜索波形

以国外某型相控阵雷达为例,其包含有近程侦察和远程侦察两种搜索模式,近程侦察模式的脉冲宽度

为 $10 \mu\text{s}$ ,包含有4个不同脉冲重复周期的信号用以消除盲速;而远程侦察模式的脉冲宽度同样为 $10 \mu\text{s}$ ,也同样依次发射不同脉冲重复周期的信号来消除盲速<sup>[6-7]</sup>,两种工作方式的脉冲重复频率如表1所示。此雷达搜索目标时方位波束宽度为 $1.5^\circ$ ,在一个方位上进行扫描时,先工作于近程侦察模式,连续发射20个近程搜索脉冲,完成近程搜索后,转入远程搜索模式,连续发射48个远程搜索脉冲,完成一个方位上的扫描需要 $7.5 \text{ ms}$ 。

表1 不同工作模式脉冲重复周期一览表

Table 1 Pulse repetition interval of different work modes kHz

脉冲重复频率	近程侦察模式	远程侦察模式
$f_1$	10.85	9.5
$f_2$	10.48	9.02
$f_3$	9.96	8.48
$f_4$	9.5	7.95

因为某一个脉冲重复周期的信号只在某一个距离范围内的搜索性能比较好,所以针对不同距离段的目标,传统的搜索波形选择分时发射不同脉冲重复周期的信号,以此达到对远、中、近各个距离段目标的搜索。但是这种搜索方式不可避免地会占用较大的时间资源,对于最大发现目标数、跟踪目标数以及跟踪精度有很大局限性。

由式(6)可知,搜索时间越短,搜索间隔时间越长,则可被跟踪的目标数就越多,相控阵雷达性能就会越好。

如果可以设计另一种波形,使得在不降低搜索性能的同时,大大减少搜索时间,则对于相控阵雷达性能提升将有很大帮助。

### 2.2 新型三频段搜索波形信号形式

在深入研究传统相控阵雷达搜索波形不足的基础上,提出一种三频段搜索信号,可在完成相同搜索功能的前提下,大量节省时间资源,大大提高了相控阵雷达的性能。

下面就其参数选择原则和具体信号形式做简要分析。

#### 2.2.1 参数选择原则

信号参数选取满足以下原则:

1) 调频带宽 $B$ 的大小主要根据距离分辨率进行选取,为方便后续信号处理,3个线性调频信号设置相同的带宽;

2) 信号的脉冲宽度主要依据目标距离范围进行选取,长信号探测远距离目标,中信号探测距离稍近,短信号探测近距离目标;

3) 为防止频谱混叠,需要在3个线性调频信号的



频带之间设置隔离带；

4) 设计信号时,脉冲重复频率以远程侦察模式为准,长信号的脉宽保持不变,求得发射一次脉冲的周期后,再解算出相应短信号的脉宽。

### 2.2.2 三频段信号

本文所设计的三频段信号由 3 个线性调频信号组成,与表 1 相对应,并按上节所讲参数选择原则,所设计的三频段信号也有 4 种不同的脉宽组合,其脉冲重复周期与表 1 中远距离侦察模式相同,以达到消除盲速的目的。脉宽组合如表 2 所示。

表 2 三频段信号脉宽组合表

Table 2 Pulse width combination of three-band signal

组合	长信号脉宽	中信号脉宽	短信号脉宽
1	10	4.0	1.0
2	10	4.8	1.3
3	10	5.7	1.8
4	10	6.5	2.2

以组合 1 为例给出相应的三频段信号时域图和频域图,如图 1、图 2 所示。其长、中、短 3 个线性调频信号的脉宽分别为 10  $\mu\text{s}$ 、4  $\mu\text{s}$  和 1  $\mu\text{s}$ ,信号采取尾部对齐的方式组合到一起。频域上,每段信号各占用 5 MHz 带宽,为防止实际输出信号由于频带延拓而出现频谱交叉干扰,各信号之间设置 1 MHz 的隔离带,3 个线性调频信号的频率范围分别为 -8.5 ~ -3.5 MHz、-2.5 ~ 2.5 MHz 和 3.5 ~ 8.5 MHz,共占用 17 MHz 带宽。

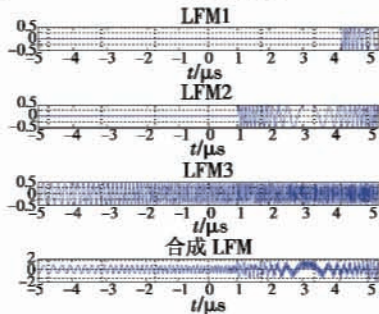


图 1 三频段信号时域波形

Fig. 1 Waveform of three-band search signal

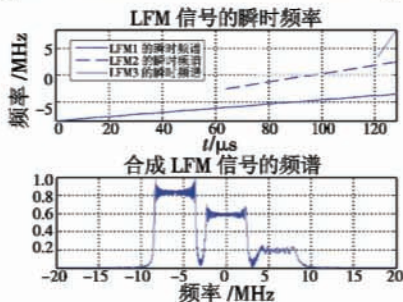


图 2 三频段信号频域波形

Fig. 2 Time-frequency diagrams of three-band signal

雷达发射的一个脉冲内同时含有 3 个频段的信号,接收时这个三频段信号经窄带采样后,分 3 个通道数字下变频和低通滤波后,就可以按照其频带将 3 个信号分别做信号处理。由 1 路信号变成 3 路信号,这样,大时宽脉冲信号能够探测较远距离,而窄脉冲信号又能消除宽脉冲信号的近距离盲区,并能高精度地分辨近距离目标,从而解决探测距离、距离分辨率的矛盾和近距离盲区问题。

### 2.3 性能分析

分析一 为分析方便,取 2.1 节中的例子。国外某型相控阵雷达完成一个方位的近程和远程搜索需要 68 个脉冲,总共需要的时间为 7.5 ms。

当采取新型三频段搜索波形时,只需要 48 个脉冲便可以完成一个方位的搜索,共需耗时 5.5 ms,对一个方位的搜索时间节省了 2 ms,节约时间资源 26.7%。

而且,当采用三频段搜索波形时,发射 48 个脉冲的情况下,对远距离目标的探测能力与采取传统波形时是相同的,因为两种方式都积累了 48 个脉冲;但对于近程目标的搜索能力,前者要远远优于后者,因为前者对近距离目标的搜索同样积累了 48 个脉冲,而后者对近距离目标仅仅积累了 20 个脉冲,相差一倍还多。因此,当采用新型三频段搜索波形时,不仅可以节省时间资源,而且探测性能也有了较大改善。

分析二 随着发现的目标越来越多,跟踪脉冲所占的比重会越来越大,而在跟踪的间隔里,留给搜索脉冲的时间会越来越来少。

假设采取两种搜索波形时,所采用的跟踪波形相同,所需跟踪的目标也一样,这时留给雷达进行搜索的时间也是相同的。在这种情况下,占用时间资源较少的三频段搜索信号会有更加良好的搜索性能。

假设采取两种搜索波形时,所需的搜索性能一致,此时,采用占用时间资源较少的三频段搜索信号会留给跟踪脉冲更多的时间资源,相应地,会有更好的跟踪性能。

### 3 仿真实验

对三频段信号应用于相控阵雷达的搜索波形进行仿真时,将整个空域分为 4 个子空域,分别记为子空域 1、2、3、4,且为了模拟真实情况,假设 4 个子空域的来敌概率分别为 40%、30%、20%、10%。为了分析方便,假设无论目标远近,达到 90% 以上的检测概率时,脉冲积累个数要大于 40 个,常规搜索波形参数与三频段搜索波形参数如表 1、表 2 所示。其他仿真参数如表 3 所示。



表3 部分仿真参数

Table 3 Some of simulation parameters

波束驻留 时间/ $\mu\text{s}$	参照目标 距离/km	确认波束驻留 时间/ $\mu\text{s}$	发现目标 概率/%
0.02	50	0.3	90

对此系统进行仿真,着重对时间资源的节省和检测性能的提高进行分析。仿真结果如图3、图4所示。

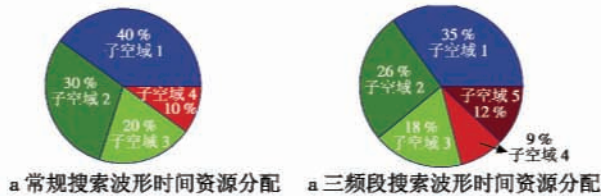


图3 三频段信号时间资源节省示意图

Fig. 3 The time-saving of three-band signal

由图3可以看出,当采用常规搜索波形时,与来敌概率相对应,对4个子空域的时间资源分配分别为40%、30%、20%、10%,而采用三频段信号进行搜索时,在达到同样90%检测概率的情况下,对4个子空域的时间资源分配分别为35%、26%、18%、9%,而剩余12%的时间资源可以用来进行其他的雷达功能。

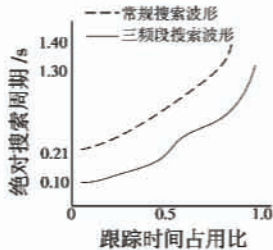


图4 搜索周期随跟踪时间占用比的变化

Fig. 4 Searching period changed with tracking-time

当搜索到的目标越来越多时,会分配越来越多的时间资源去对发现目标进行跟踪,跟踪时间占总时间的比例从0变化到100%,图4显示了当跟踪时间占用比越来越大时,绝对搜索周期的变化情况。图4中,绝对搜索周期指按顺序搜索360°空域所花费的时间,所有的雷达功能,搜索时间、跟踪时间、确认时间都包含在其中。由图4可以看出,无论采用哪种搜索波形,绝对搜索周期都随跟踪时间占用比的增加而快速增加;而横向比较,当绝对搜索时间相同时,采用三频段信号时的跟踪时间占用比较大,说明此时有更多的时间资源来对目标进行跟踪;纵向比较,当跟踪时间占用比相同时,采用三频段信号的绝对搜索周期较短,即完成360°空域的搜索用时更短,从而对目标的漏警更少。

#### 4 结束语

本文提出了一种新型三频段搜索波形,对其参数选择原则进行了分析,给出了三频段信号的具体参数,

对其进行了时域和频域上的分析,之后通过和传统搜索波形进行对比分析,论证了三频段信号可以有效缩短搜索目标所用的时间,节省了时间资源,提高了相控阵雷达的探测性能。

同样地,跟踪波形在相控阵雷达的工作中占很大比例,下一步将对三频段信号或类似信号在跟踪过程中的应用进行研究,以期使相控阵雷达的性能得到进一步提高。

#### 参考文献

- [1] 蒋德富. 相控阵雷达系统设计的研究[J]. 现代雷达, 1998, 6:1-7.  
JIANG D F. Research phased array radar system design [J]. Modern Radar, 1998, 6:1-7.
- [2] 张立韬, 李盾, 王国玉. 相控阵雷达搜索参数研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(10):20-25.  
ZHANG L T, LI D, WANG G Y. Phased array radar search parameter study [J]. Modern Radar, 2008, 30(10): 20-25.
- [3] 张永杰, 李少洪, 朱海冰. 多功能相控阵雷达优化搜索建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4248-4251.  
ZHANG Y J, LI S H, ZHU H B. Research on modeling and simulation of optimal search of multifunction phased array radar [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16):4248-4251.
- [4] 卢建斌, 胡卫东, 郁文贤. 相控阵雷达资源受限时最优搜索性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(10):1388-1390.  
LU J B, HU W D, YU W X. Research on optimal search performance of phased array radars with limited resources [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(10): 1388-1390.
- [5] 张华睿, 杨宏文, 郁文贤. 相控阵雷达最优搜索参数设计研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9):1062-1065.  
ZHANG H R, YANG H W, YU W X. Design of optimal search operation parameters for phased array radar [J]. Acta Armamentar, 2012, 33(9):1062-1065.
- [6] 钱李昌, 许稼, 孙文峰, 等. 基于雷达脉冲重复间隔设计的 Radom-Fourier 变换盲速旁瓣抑制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11):2608-2614.  
QIAN L C, XU J, SUN W F, et al. Blind speed side lobe suppression in Radon-Fourier transform based on radar pulse recurrence interval design [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(11):2608-2614.
- [7] 刘涛, 龚耀寰. 参差重复频率分析和设计[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(2):173-176.  
LIU T, GONG Y H. Staggered PRF analysis and design [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(2):173-176.