

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.006

天空双基地预警雷达空间同步效果优化

王 庚¹, 陆晓飞², 袁俊泉², 陈阿磊², 王力宝²

(1. 空军预警学院研究生管理大队, 湖北武汉 430019;
2. 空军预警学院, 湖北武汉 430019)

摘要: 天空双基地预警雷达空间同步效果评估与优化是其空间同步技术的重要一环。首先, 提出了空间同步效果的评估指标, 分析其三大影响因素; 其次, 针对每个波位需要的波束驻留时间不同的问题, 提出了脉冲积累优化方案, 对其工作流程和相关参数计算进行推导; 然后, 从对波位编排灵活控制的角度提出了波位编排优化方案; 最后, 设计仿真实验对两种同步效果优化方案进行验证。仿真结果表明: 两种优化方案可以使得接收信噪比和空间覆盖率的空间分布更加均匀, 提高了发射能量的利用效率, 有助于空间同步效果的优化。

关键词: 天空双基地预警雷达; 空间同步优化; 脉冲积累优化; 波位编排优化

中图分类号: TN957.52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2018)03-0267-08

Optimization of Spatial Synchronization of Space-Air Based Bistatic Early Warning Radar

WANG Geng¹, LU Xiaofei², YUAN Junquan², CHEN Alei², WANG Libao²

(1. Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;
2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: In this paper, we study the evaluation and optimization of spatial synchronization of space-air based bistatic early warning radar. First, this paper proposes the evaluation index of spatial synchronization effect and analyses the three main factors. Secondly, for different dwell time of each wave, the pulse accumulation optimization is proposed, the work flow and the relevant parameters are deduced. Then, the beam position arrangement optimization is proposed for flexible arrangement on the beam position. Finally, the simulation experiments are made to verify two kinds of synchronization optimization schemes. The simulation result shows that the two optimization schemes can make the SNR and spatial coverage of the spatial distribution smoother and improve the utilization efficiency of emission energy which can contribute to optimization of spatial synchronization effect.

Key words: space-air based bistatic early warning radar; spatial synchronization optimization; pulse accumulation optimization; beam-position arrangement optimization

0 引言

天空双基地预警雷达^[1]是天基预警雷达^[2]的一种特殊形式, 由于收发分置使得空间同步对雷达正常工作影响很大。空间同步效果评估和空间同步效果优化是对空间同步问题的进一步研究。在国内, 周鹏^[3]在评估天空双基地 SAR 的空间同

步性能时有针对性地提出了成像时间、场景长度和方位分辨率三个评估指标。丁建松^[4]在评估双基地 SAR 的空间同步效果时利用空间同步精度为评估指标。由于天空双基地预警雷达作为最近几年提出的一种新型雷达^[5], 相关研究还处于起步阶段^[6], 针对其空间同步效果评估和优化的研究未在国内外文献中见到。借鉴传统单基地雷达对于雷达性能指标研究^[7], 首先提出空间同步效

果评估指标,基于天空双基地预警雷达的特点^[8],分析相关影响因素,并设计相应的优化方案。

基于天空双基地雷达的基本模型^[9],首先提出评估空间同步效果的量化指标,分析影响目标数据率的几个主要因素,并通过仿真实验对几种空间同步技术进行同步效果评估;然后,从提高目标数据率的角度进行空间同步效果的优化,提出了脉冲积累空间同步优化方案,通过自适应控制每个波位的脉冲积累时间,减少了部分波位的脉冲积累时间,通过仿真实验对该优化方案的空间同步优化效果进行验证;最后,从合理安排波位编排的角度,提出了波位编排空间同步优化方案,通过自适应控制监视区域的区域划分,合理安排波位,减少了空间同步中部分监视区域的重复覆盖,提高了数据率,并通过仿真实验对优化效果进行验证。

1 空间同步效果评估

1.1 评价指标

监视区域目标数据率是评估雷达目标发现能力和跟踪能力的重要参数,高的数据率意味着雷达可以发现速度更快的目标,拥有更多的时间资源进行目标跟踪^[10]。在评估天空双基地预警雷达空间效果时,本文也采用了数据率作为评价指标。

1) 扫描周期

天空双基地预警雷达在对指定的监视区域进行波束扫描时,对监视区域内所有目标完成一次扫描任务的时间称为扫描周期 T_s 。扫描周期的大小反映了雷达对于监视区域内目标的扫描速度,扫描周期即雷达发射波束对指定范围进行扫描到再次对该指定范围进行扫描的时间间隔。

在不考虑雷达基本参数变化的情况下,扫描周期 T_s 的大小与收发波束的扫描方式、采用的空间同步技术、每个扫描波位的脉冲积累时间和扫描区域划分的合理性等因素有关,由于本文中天空双基地预警雷达只采用窄波束发射、窄波束接收的扫描方式,所以影响扫描周期 T_s 的主要因素只有 3 个:目标回波的接收效率、扫描波位的脉冲积累时间和扫描区域划分方案。

2) 目标数据率

目标数据率 D_R 是指单位时间内监视区域内

指定范围内目标被扫描的次数,其与扫描周期 T_s 的关系如下:

$$D_R = \frac{1}{T_s} \quad (1)$$

由上式可以得到,数据率 D_R 的主要影响因素和扫描周期相同,当采用相同的扫描波位积累时间和扫描区域划分方案时,数据率 D_R 可以用来评估不同空间同步技术的空间同步效果。

1.2 影响因素

影响天空双基地预警雷达数据率的因素主要有 3 个:一是接收波束对于发射能量的接收效率;二是每个波位的脉冲积累时间的合理性;三是对监视区域波位编排的合理性。下面将针对上述 3 个影响因素的影响原理和优化方案进行详细分析。

1) 接收效率

接收波束对于发射能量的接收效率 η 是指在同样的波束扫描场景和相同的发射波束驻留时间的条件下,接收波束能够接收到发射脉冲的数量 N_r 与实际发射脉冲总数 N_t 的比率。接收波束只能覆盖发射波束覆盖空域的一部分,只能接收到发射波束覆盖空域中所有目标回波中的一部分,所以接收波束在单位时间内覆盖到的空域越大,接收到的目标回波越多,接收效率越高。例如,在同样条件下,利用接收同时多波束技术^[11]形成的“空间接收多波束”和利用脉冲追赶同步技术^[12]形成的“时间接收多波束”相对于简单的单波束窄发窄收接收到的发射脉冲的数量更多,因而对应的接收效率更高。

接收效率 η 的计算公式如下:

$$\eta = \frac{N_r}{N_t} \times 100\% \quad (2)$$

由于发射脉冲在沿发射波束方向跨越多个波位向前传播时,可能被多个接收波束接收到,接收效率 η 可能超过 100%。

2) 脉冲积累

为了达到目标检测对于接收信噪比的要求,每个波位需要的脉冲积累时间必须满足目标检测的下限,但在进行扫描方案制定时,通常会对每个波位采用统一的脉冲积累时间。这样,由于整个监视区域中每个波位对应的收发波束指向和收发

距离不同,甚至相同波位在不同时间的扫描过程中,也会面临不同的收发波束指向和收发距离,这会使得每个波位需要的最低脉冲积累时间不同,这样每个波位对应的超过下限的那部分脉冲积累时间会降低数据率。

脉冲积累冗余率 η_p 是指监视区域的平均接收信噪比超过检测要求的接收信噪比的部分与检测要求的接收信噪比的比值,其计算公式如下:

$$\eta_p = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SNR_i - SNR_{\min}}{SNR_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,N 为目标区域的波位数目, SNR_i 为第 i 个波位的接收信噪比, SNR_{\min} 为满足检测要求允许的最小接收信噪比。当 N 取值为 1 时, η_p 对应的是每个波位的脉冲积累冗余率。通过控制每个波位的脉冲积累时间,使得整个监视区域的接收信噪比分布均匀,大大降低脉冲积累冗余率,可以有效提高天空双基地预警雷达的目标数据率,提高空间同步的效果。

3) 波位编排

为了达到监视区域的无缝隙监视,在进行空间同步时,收发波束必须同时覆盖每个波位对应的扫描区域,因此在进行波位编排时,划分的扫描区域体积必须小于收发波束重叠区域体积。在进行波位编排时,通常会将监视区域划分为相同大小的扫描区域,而没有考虑到扫描过程中收发波束重叠区域体积的变化。如果划分扫描区域体积相对于收发波束重叠区域体积过小,会大大提高扫描区域的重复覆盖率,而这些会降低数据率,降低空间同步的效果。

空间重复覆盖率 η_r 是指收发波束同时覆盖区域所占体积超过监视区域的部分与监视区域的比值,其计算公式如下:

$$\eta_r = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{ci} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中,N 为目标区域的波位数目,当 N 取值为 1 时, η_{ci} 对应的是第 i 个扫描波位的空间重复覆盖率。在进行波位编排时,通过灵活划分监视区域,进行自适应的波位编排,从而减小扫描过程中的空间重复覆盖率 η_r ,可以有效提高发射能量的利用率,减少整个监视区域的扫描时间,提高雷达系统的数据率。

1.3 空间同步效果对比

下面从目标数据率的角度对 3 种空间同步技术的空间同步效果进行评估。表 1 是在采用 4.1 节中仿真场景和雷达系统模型参数并在同一场景下 3 种空间同步技术仿真实验中对应的空间同步方案的空间同步效果参数表。

表 1 3 个空间同步方案的空间同步效果对比

空间同步技术	平均扫描周期	目标数据率	接收效率	脉冲积累冗余率	空间重复覆盖率
	T _s /s	D _R	$\eta/\%$	$\eta_p/\%$	$\eta_r/\%$
单波束空间同步	2	0.5	100	34.6110	74.4310
接收同时多波束	0.4	2.5	500	35.5454	38.0705
脉冲追赶同步技术	0.4	2.5	500	36.0335	68.4390

由表 1 可知,接收同时多波束技术和脉冲追赶技术由于运用了“多波束”技术,大大提高了接收效率,从而可以得到更高的目标数据率,接收同时多波束技术和脉冲追赶技术的空间同步效果相对于单波束空间同步技术更好。

2 脉冲积累优化

空间同步的方案中,每个扫描划分区域的脉冲积累数是固定的,由于空间同步过程中,接收波束会发生波束展宽,而且不同扫描划分区域对应的接收距离可能存在差异,使得整个扫描区域的接收信噪比分布不均,这使得发射能量不能够高效利用,导致整个监视区域的扫描周期过长。为了高效利用发射能量,提高目标数据率,提升空间同步的效果,本文提出了自适应脉冲积累技术。通过采用数量可变的脉冲积累数,使得整个监视区域中每个波位的接收信噪比均匀分布并且有效减少收发波束重复覆盖率。

2.1 算法流程

由于天空双基地预警雷达的发射天线位于卫星上,电磁波的传播路径长,为了能够获得足够的目标回波信号,满足检测要求,天空双基地预警雷达需要进行较长时间的脉冲积累。针对不同的空间同步技术,脉冲积累优化的算法稍有不同,下面,本文将针对单波束空间同步技术的脉冲积累优化的具体算法进行介绍,接收同时多波束和脉冲追赶同步与单波束算法原理一致,但计算量更

大,计算更复杂。

图 1 是针对单波束空间同步方式的脉冲积累优化方案示意图。

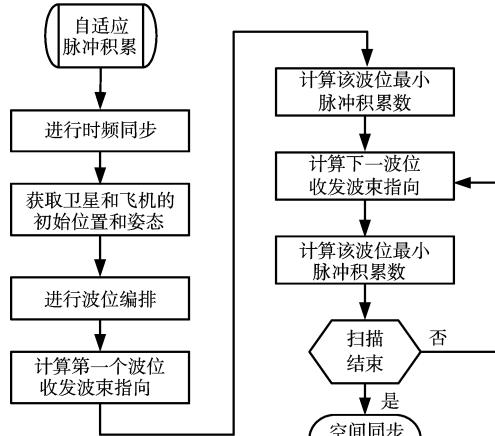


图 1 脉冲积累优化方案流程图

由图 1 可以看出,进行脉冲积累优化时,需要计算每个接收波位的最小脉冲积累数。

2.2 脉冲积累数

在文献[11]中推导得到了天空双基地预警雷达的接收信噪比的计算公式如下:

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma G_{pc} G_{pa}}{(4\pi)^3 k T_0 B F_n R_t^2 R_r^2 L_s} \quad (5)$$

式中, G_{pc} 为脉冲压缩增益, G_t 为发射天线增益, G_r 为接收天线增益, P_t 为发射功率, λ 为载频波长, σ 为雷达反射截面积, F_n 为噪声系数, L_s 为系统其他损耗, B 为载频带宽, R_t 为接收距离, R_r 为发射距离,脉冲积累增益 G_{pa} 满足:

$$G_{pa} = T_{pi} f_r = N_i T_p d \cdot f_r = N_i D \cdot f_r \quad (6)$$

式中, T_{pi} 为第 i 个扫描波位的脉冲积累时间, f_r 为脉冲重复频率, T_p 为脉冲重复周期, d 为脉冲占空比, D 为每个脉冲的脉冲持续时间, N_i 为第 i 个扫描波位的脉冲积累数。

假设最低要求的接收信噪比为 SNR_{min} ,则第 i 个扫描波位的脉冲积累数 N_i 满足:

$$N_i = \frac{SNR_{min} (4\pi)^3 k T_0 B F_n R_t^2 R_r^2 L_s}{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma G_{pc} D f_r} \quad (7)$$

由于脉冲积累数 N_i 为整数,则

$$N_i = \text{ceil}\left(\frac{SNR_{min} (4\pi)^3 k T_0 B F_n R_t^2 R_r^2 L_s}{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma G_{pc} D f_r}\right) \quad (8)$$

以上计算过程是针对单波束空间同步方式。下面,本文将分别针对利用脉冲追赶技术和接收

同时多波束技术进行空间同步时相应的自适应脉冲积累数的计算。

由于脉冲追赶同步过程中,接收追赶到波束对发射波束覆盖的多个扫描划分区域连续扫描,这样使得相同发射波束覆盖下的不同扫描波位的脉冲积累数必须相同。所以在计算脉冲追赶到的第 j 个发射波束扫描波位时的脉冲积累数 N_{pj} 时,需要先计算该发射波束扫描波位对应发射波束覆盖下的不同接收波束扫描波位对应的脉冲积累数 N_i ,其计算过程与上一小节中一致。然后就可以确定脉冲追赶到同步时的脉冲积累数 N_{pj} :

$$N_{pj} = \max(N_1, N_2, \dots, N_i) \quad (9)$$

同理,接收同时多波束空间同步时,多个接收波束同时覆盖同一发射波束扫描波位对应的不同接收波束扫描波位,需要先计算该发射波束扫描波位对应的多个不同接收波束扫描波位对应的脉冲积累数 N_i ,再取多个脉冲积累数中的最大值作为该发射波束扫描波位的接收同时多波束下的脉冲积累数。

3 波位编排优化

单波束空间同步方式在进行波位编排的时候,尽管已经考虑到收发波束在扫描过程中,对不同波位的波束覆盖宽度会不同,但为了操作简便,简化了波位编排设计的复杂性,只取在整个监视过程中收发波束最窄的覆盖宽度作为进行波位编排的依据。这样导致了整个监视区域在每个扫描周期中存在大量的重复覆盖区域,这无疑降低了发射能量的利用效率,降低了雷达系统的数据率。本节从灵活控制每个波位对应扫描区域大小的角度,在进行波位编排过程中,使收发波束重叠区域刚好覆盖相应波位对应的扫描区域。

3.1 算法流程

在波位编排优化中,每个发射波位对应着多个接收波位,需要先完成一个发射波位的编排,再完成该发射波位对应的所有接收波位的编排,然后再进行下一发射波位的编排,依次循环。图 2 是波位编排优化的算法流程图。

3.2 波位编排

本文在对矩形划分方案进行波位编排优化

时,主要是将整个监视区域沿经度、纬度和高度三个方向进行合理划分,形成相应的发射波束波位编排和接收波束波位编排。其具体的波位编排过程如图 3 所示。

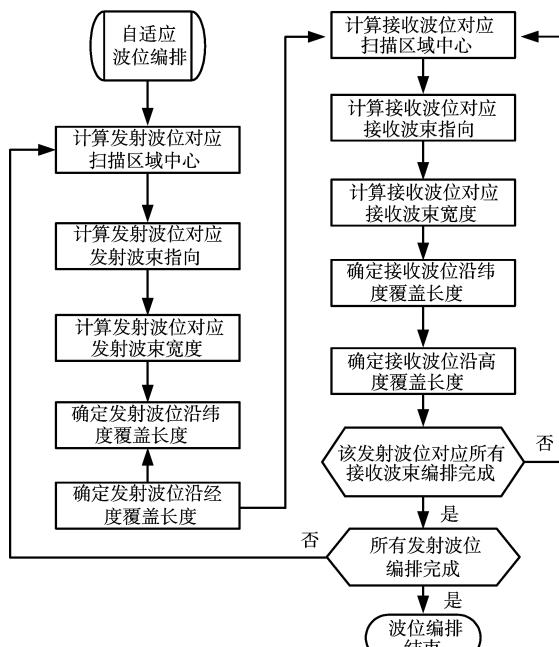


图 2 波位编排优化算法流程图

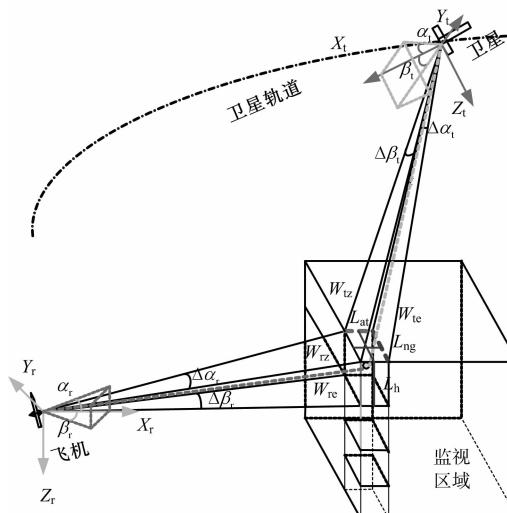


图 3 波位编排优化过程示意图

如图 3 所示,每一个发射波位对应着多个接收波位,在确定第一个发射波位时需要确定对应波位发射波束所需要覆盖的区域大小,也就是图中的发射波位对应划分区域沿经度长度 L_{ng} 和沿纬度长度 L_{at} ,由前文的推导公式可得,发射波束方位覆盖宽度 $W_{tz}=R_t \cdot \Delta\alpha_t$,发射波束俯仰覆盖宽度 $W_{te}=R_t \cdot \Delta\beta_t$,接收波束方位覆盖宽度 $W_{rz}=$

$R_r \cdot \Delta\alpha_r$,则可得

$$L_{at} = \min(W_{te}, W_{rz}) \quad (10)$$

在设计发射波位时,划分区域处于同一纬度线上的所有发射波位的对应划分区域沿经度长度 L_{ng} 相同,所以在计算第一个发射波位的 L_{ng} 时,需要先计算出同一纬度线上所有发射波位的沿经度覆盖宽度 $W_{tz1}, W_{tz2}, \dots, W_{tzN}$,然后可以计算出:

$$L_{ng} = \min(W_{tz1}, W_{tz2}, \dots, W_{tzN}) \quad (11)$$

在确定第一个发射波位对应的第一个接收波位的接收波束所需要覆盖区域大小时,需要确定接收波位对应划分区域沿纬度长度 L_{at} 和沿高度长度 L_h ,其中 L_{at} 的计算过程如式(10)所示,确定 L_h 时,如果采用单波束同步技术或接收同时多波束同步技术,则简化计算得到

$$L_h = R_r \cdot \Delta\beta_r \quad (12)$$

如果采用脉冲追赶同步技术或多波束脉冲追赶技术,则简化计算得到

$$L_h = D \cdot c \quad (13)$$

确定第二发射波位对应的扫描区域中心坐标时,其位置为第一个发射波位对应的扫描区域中心沿经线平移 L_{ng} 的距离。

4 仿真实验与分析

仿真场景与文献[11]中仿真实验的仿真场景一致。雷达系统模型参数如表 2 所示。

表 2 天空双基地预警雷达系统模型参数

参数名称	取值
卫星轨道高度 H_t/km	800
卫星运行速度 $V_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	7 456
升交点赤经/(°)	0
近地点幅角/(°)	0
轨道倾角/(°)	49.1
轨道幅角/(°)	130.8
飞机高度 H_r/km	15
飞机飞行速度 $V_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	100
脉冲重复频率 f_r/kHz	50
发射功率 P_t/kW	200
发射天线孔径 A_t/m^2	11×11
接收天线孔径 A_r/m^2	4.5×2.2
雷达波长 λ/m	0.2
载频信号带宽 B/MHz	1
雷达反射截面积 σ/m^2	1
发射脉冲占空比	0.2

4.1 仿真参数设置

1) 仿真实验一

波位编排方案即监视区域划分方案如图 4 所示。

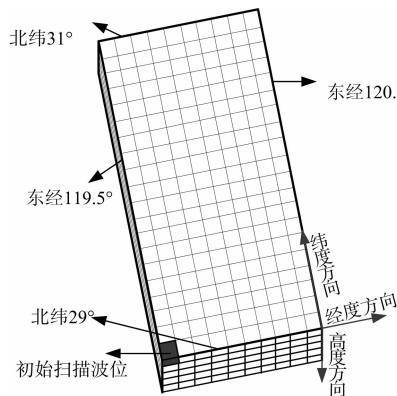


图 4 波位编排方案

整个监视区域按照经度方向均分为 10 份、纬度方向均分为 20 份、高度均分为 5 份的区域划分方案共划分为 1000 个波位, 每个波位对应的扫描区域为经度跨度为 0.1° , 纬度跨度为 0.1° , 高度跨度为 6 km。

扫描过程中, 发射波束从图 4 中阴影区域开始扫描, 按照先沿高度方向向下, 再沿纬度方向向北, 最后沿经度方向向东的扫描方式依次扫描每个波位。整个扫描过程中, 雷达对监视区域共扫描 30 次。

2) 仿真实验二

波位编排方案按照波位编排优化的计算流程自动进行设计, 扫描过程中, 发射波束从东经 119.5° 、北纬 29° 、距地面 30 km 的位置开始扫描, 按照先沿高度方向向下, 再沿纬度方向向北, 最后沿经度方向向东的扫描方式依次扫描每个波位, 每个波位的波束驻留时间为 2 ms, 脉冲积累数为 100。整个扫描过程中, 雷达对监视区域共扫描 30 次。

4.2 仿真结果与分析

1) 仿真实验一

表 3 是单波束空间同步技术在采用脉冲积累优化前后的空间同步效果参数的变化情况。对比可得, 脉冲积累优化之后的目标数据率倍增, 脉冲积累冗余率接近于 0, 但空间覆盖率的变化不大。

图 5 和图 6 是单波束空间同步技术在使用脉冲积累优化前后的接收信噪比空间分布的变化情况。观察可得, 进行脉冲积累优化之后, 接收信噪

比的分布更加均匀, 处于 $10.6 \sim 10.8$ dB 之间, 对于发射能量的利用效率大大提高。

表 3 脉冲积累优化方案的空间同步效果优化

脉冲积累优化前后	平均扫描周期 T_s/s	目标数据率 $D_R/\%$	接收效率 $\eta/\%$	脉冲积累冗余率 $\eta_p/\%$	空间重复覆盖 $\eta_r/\%$
优化之前	2	0.5	100	34.6110	74.4310
优化之后	0.9993	1.0007	100	0.5034	73.0785

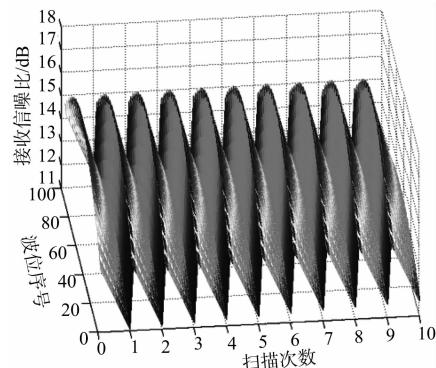


图 5 脉冲积累优化之前接收信噪比分布图

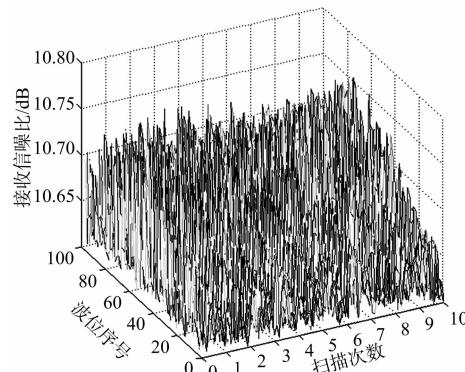


图 6 脉冲积累优化之后接收信噪比分布图

图 7 和图 8 是单波束空间同步技术在采用脉冲积累优化前后的空间覆盖率空间分布的变化情况。观察可得, 进行脉冲积累优化前后的空间覆

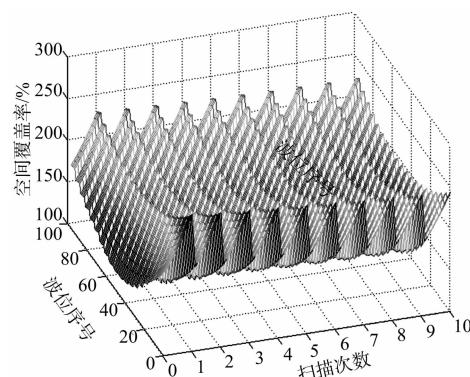


图 7 脉冲积累优化之前空间覆盖率分布图

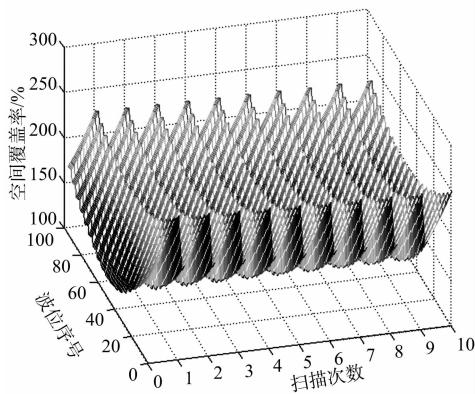


图 8 脉冲积累优化之后空间覆盖率分布图

盖率变化不大,脉冲积累优化方案对于空间同步过程中每个波位的空间覆盖率影响不大。

2) 仿真实验二

表 4 是单波束空间同步技术在使用波位编排优化前后的空间同步效果参数的变化情况。对比可得,波位编排优化之后的目标数据率提高 40.64%,空间重复覆盖降低 78.53%,但脉冲积累冗余率的变化不大,仅仅稍微变大。

表 4 波位编排优化方案的空间同步效果优化

波位编排 优化前后	平均扫 描周期 T_s/s	目标 数据率 D_R	接收 效率 $\eta/\%$	脉冲积累 冗余率 $\eta_p/\%$	空间重复 覆盖率 $\eta_r/\%$
优化之前	2	0.5	100	34.6110	74.4310
优化之后	1.4221	0.7032	100	37.4640	15.9804

图 9 和图 10 是单波束空间同步技术在使用波位编排优化前后的接收信噪比空间分布的变化情况。观察可得,进行波位编排优化前后的空间覆盖率分布出现变化,但分布依然很不均匀,变化范围和之前一致,波位编排优化方案对于空间同步过程中空间覆盖率的影响不大。

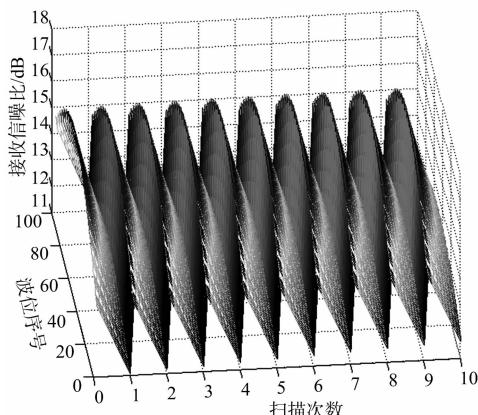


图 9 波位编排优化之前接收信噪比分布图

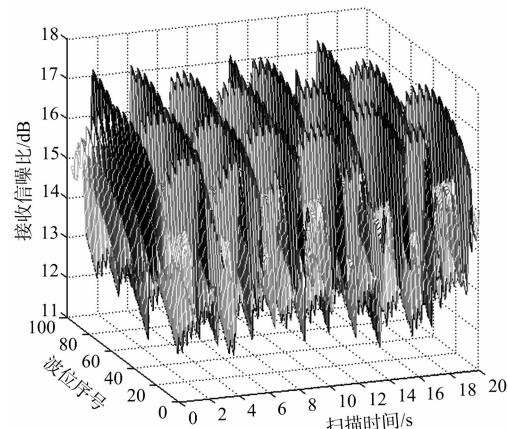


图 10 波位编排优化之后接收信噪比分布图

图 11 和图 12 是单波束空间同步技术在采用波位编排优化前后的空间覆盖率空间分布的变化情况。观察可得,进行波位编排优化之后,空间覆盖率的分布更加均匀,处于 108%~118% 之间,对于发射能量的利用效率大大提高,空间同步效果得到提高。

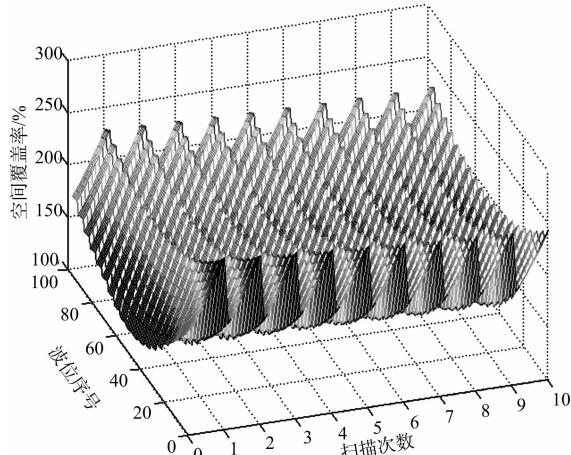


图 11 波位编排优化之前空间覆盖率分布图

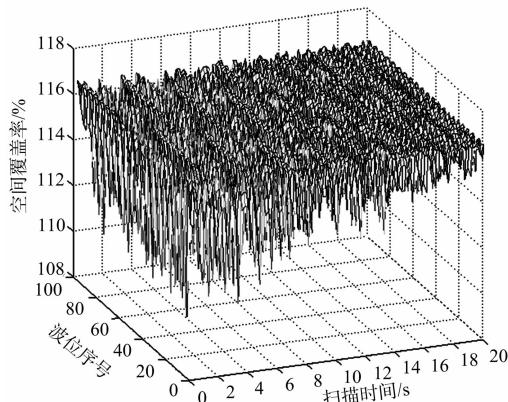


图 12 波位编排优化之后空间覆盖率分布图

5 结束语

主要针对天空双基地雷达空间同步效果的评估和优化问题进行研究。首先,提出空间同步效果评估的标准,分析了影响空间同步效果的三大因素,对3种同步技术的空间同步效果进行对比;然后,从脉冲积累和波位编排两个角度提出了脉冲积累优化和波位编排优化两种空间同步效果优化方案;最后,通过仿真实验对两种优化方案的优化效果进行量化和验证。由理论分析及仿真结果可知:

1) 目标数据率可以反映空间同步方案的空间同步效果,接收波束对于发射能量的接收效率、每个波位的脉冲积累时间和波位编排设计是影响目标数据率的三大因素。

2) 3种空间同步技术中,相同的仿真场景下,单波束空间同步的接收效率最低,目标数据率最低,接收同时多波束和脉冲追赶同步技术的接收效率和目标数据率相同,但接收同时多波束的空间重复覆盖的程度更低。

3) 脉冲积累优化方案可以让每个波位对应区域的接收信噪比的分布更加均匀,脉冲积累的冗余程度得到降低,目标数据率得到提高,但对于空间重复覆盖问题没有改善。

4) 波位编排优化方案可以改善空间重复覆盖的现象,降低空间重复覆盖率,提高目标数据率,但对于脉冲积累现象的影响不大。

参考文献:

- [1] 贲德,王海涛. 天基监视雷达新技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2014:340-356.
- [2] 贲德,龙伟军. 天基雷达的关键技术[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(4):391-396.
- [3] 周鹏. 星机双基地 SAR 系统总体和同步技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.
- [4] 丁建松. 双基地 SAR 同步技术研究与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2013:35-36.
- [5] 袁博资,马晓岩,袁俊泉,等. 天空双基地雷达体制分析和参数设计[J]. 空军预警学院学报, 2014, 28(2): 89-92.
- [6] 黄忠言,袁俊泉,王力宝,等. 天空双基地预警雷达非平稳杂波特性分析[J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(4):235-238.
- [7] HURLEY S M. Signal-to-Noise Ratio Gains and Synchronization Requirements of a Distributed Radar Network [D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2006.
- [8] HARTNETT M P, DAVIS M E. Operations of an Airborne Bistatic Adjunct to Space Based Radar[C]// IEEE Radar Conference, Huntsville, AL: IEEE, 2003:133-138.
- [9] 王庚,袁俊泉,王力宝,等. 天空双基地预警雷达空间同步设计分析[J]. 空军预警学院学报, 2016, 30(2): 89-94.
- [10] MIRANDA S, BAKER C, WOODBRIDGE K, et al. Knowledge-Based Resource Management for Multi-function Radar: A Look at Scheduling and Task Prioritization[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1):66-76.
- [11] 王庚,袁俊泉,王力宝,等. 天空双基地预警雷达空间同步方案设计[J]. 空军预警学院学报, 2016, 30(6): 404-409.
- [12] 王庚,袁俊泉,王力宝,等. 天空双基地预警雷达空间同步技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(4): 449-456.
WANG Geng, YUAN Junquan, WANG Libao, et al. Research on Spatial Synchronization Technique of Space-Air Based Bistatic Early Warning Radar[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15 (4): 449-456. (in Chinese)

作者简介:



王 庚 男,1991年1月生,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为目标检测与识别。

E-mail:1532738319@qq.com



陆晓飞 男,1993年3月生,江苏江阴人,空军预警学院雷达兵器工程运用重点实验室硕士研究生,主要研究方向为阵列信号处理。