

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 12 月 9 日 (09.12.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/244030 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01S 7/40 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/070302
- (22) 国际申请日: 2021 年 1 月 5 日 (05.01.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010483275.0 2020年6月1日 (01.06.2020) CN
- (71) 申请人: 南京航空航天大学 (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) [CN/CN]; 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。
- (72) 发明人: 时晨光 (SHI, Chenguang); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。丁琳涛 (DING, Lintao); 中国江苏省南京市秦淮

区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。王奕杰 (WANG, Yijie); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。周建江 (ZHOU, Jianjiang); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。

(74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING SUGAO PATENT AND TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市白下区中山东路198号龙台国际大厦1912室, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) **Title:** RADIO FREQUENCY STEALTH TRANSMISSION POWER OPTIMIZATION METHOD FOR SUB-APER-TURE-FREQUENCY DIVERSE ARRAY RADAR

(54) 发明名称: 针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法

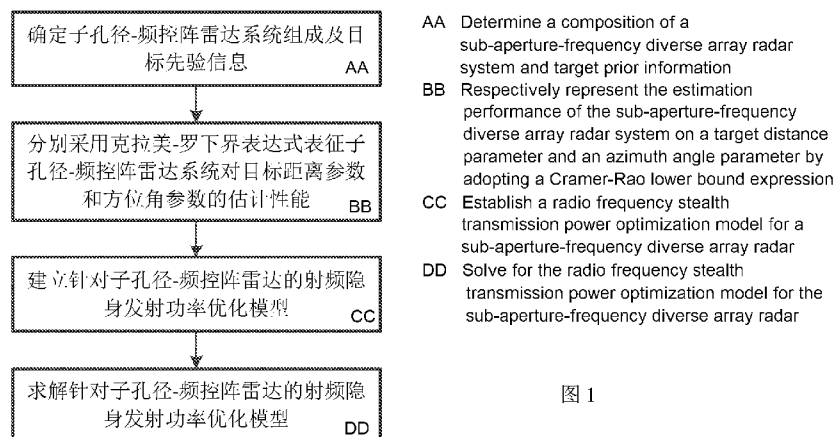


图 1

(57) **Abstract:** A radio frequency stealth transmission power optimization method for a sub-aperture-frequency diverse array radar, comprising: determining a composition of a sub-aperture-frequency diverse array radar system and target prior information; respectively representing the estimation performance of the sub-aperture-frequency diverse array radar system on a target distance parameter and an azimuth angle parameter by adopting a Cramer-Rao lower bound expression; establishing a radio frequency stealth transmission power optimization model for the sub-aperture-frequency diverse array radar; and solving for the radio frequency stealth transmission power optimization model for the sub-aperture-frequency diverse array radar. The method not only meets the requirements of estimating a Cramer-Rao lower bound threshold by a given target distance parameter and estimating the Cramer-Rao lower bound threshold by a target azimuth angle parameter, but also effectively reduces the transmission power of the sub-aperture-frequency diverse array radar system, thereby improving the radio frequency stealth performance of the system.

MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法, 包括: 确定子孔径-频控阵雷达系统组成及目标先验信息; 分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的估计性能; 建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型; 求解针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型。不仅满足了给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值要求, 而且有效降低了子孔径-频控阵雷达系统的发射功率, 从而提高了系统的射频隐身性能。

针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法

技术领域

本发明涉及雷达信号处理技术，具体涉及针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法。

背景技术

2006年，美国学者 Antonik 和 Wicks 在每年一度的 IEEE 雷达年会上首次提出了频控阵雷达的概念，随后便引起了巨大的反响。频控阵雷达阵列的相邻阵元之间存在一个很小的频率增量，且远小于载频。由此一来，频控阵雷达的波束指向便同时具有角度依赖性和距离依赖性。

然而，当频控阵雷达对目标进行方位角与距离的联合估计时，频控阵雷达方位角与距离估计的克拉美-罗下界将会变得很大。这是由于频控阵雷达在方位角向和距离向存在耦合。因此，传统频控阵雷达并不适用于直接对目标的方位角和距离参数进行联合估计，而子孔径-频控阵雷达可以较好地克服这一难题。

雷达射频隐身技术是指通过控制己方雷达信号的射频辐射特征，缩短敌方无源探测系统对雷达的有效作用距离，提高雷达平台的生存能力。雷达射频隐身研究贯穿于敌方无源探测系统对雷达信号的发现、分选识别和定位的全过程。因此，雷达射频隐身技术具有重要的军事意义和现实需求。

然而，现有技术中尚未有针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法。

发明内容

发明目的：为解决现有技术的不足，本发明提出了针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，有效降低了子孔径-频控阵雷达系统的发射功率，达到了提高系统射频隐身性能的目的。

技术方案：为实现上述发明目的，本发明采用以下技术方案：

针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，包括以下步骤：

- (1) 确定子孔径-频控阵雷达系统组成及目标距离和方位先验信息；
- (2) 分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的估计性能；
- (3) 建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型；

(4) 求解针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型。

进一步的, 步骤(1)中子孔径-频控阵雷达系统包括 N_T 个阵元, 该系统将均匀线性雷达阵列平均分为两个子阵, 每个子阵所含的阵元数目为 N_S , 且每个子阵的阵元间距均为 D ; 两个子阵采用不同的频率增量, 其中, 第一个子阵阵元发射频率增量为 ΔF_1 , 第二个子阵阵元发射频率增量为 ΔF_2 , 子孔径-频控阵雷达发射信号波长为 λ ;

另外, 根据战场先验信息, 获取目标与子孔径-频控阵雷达之间的距离为 R , 目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角为 ϑ 。

进一步的, 步骤(2)具体为:

子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数估计的克拉美-罗下界表达式为:

$$\text{CRB}_R = \frac{c^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_T} (n-1)^2}{8 \cdot \text{SNR} \cdot \pi^2 \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (1);$$

其中, c 为光速,

$$\chi_1 = (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 \quad (2);$$

$$\chi_2 = (\Delta F_1 + \Delta F_2) \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 + \Delta F_2 \cdot N_S \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 \quad (3);$$

其中, ΔF_1 为第一个子阵阵元发射频率增量, ΔF_2 为第二个子阵阵元发射频率增量, N_T 为子孔径-频控阵雷达系统中的阵元个数, N_S 为每个子阵所含的阵元数目;

SNR 表示子孔径-频控阵雷达接收机的输出信噪比, 表示为:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{rad}} \cdot |\zeta|^2}{\sigma_w^2} \quad (4);$$

其中, P_{rad} 为子孔径-频控阵雷达的发射功率, ζ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的散射系数, σ_w^2 为子孔径-频控阵雷达接收机的噪声功率;

子孔径-频控阵雷达系统对目标方位角参数估计的克拉美-罗下界表达式为:

$$\text{CRB}_g = \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \text{SNR} \cdot \pi^2 D^2 \cdot \cos^2 \vartheta \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (5);$$

其中, λ 为子孔径-频控阵雷达发射信号波长, D 为每个子阵的阵元间距, ϑ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角。

进一步的, 步骤 (3) 中根据给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值 ξ_R 和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值 ξ_g , 建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型:

$$\left. \begin{array}{l} \min_{P_{\text{rad}}} P_{\text{rad}}, \\ \text{s.t.: } \text{CRB}_R \leq \xi_R, \\ \text{CRB}_g \leq \xi_g, \\ 0 \leq P_{\text{rad}} \leq \overline{P_{\text{max}}}. \end{array} \right\} \quad (6);$$

其中, P_{rad} 为子孔径-频控阵雷达的发射功率, CRB_R 为子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数估计的克拉美-罗下界, CRB_g 为子孔径-频控阵雷达系统对目标方位角参数估计的克拉美-罗下界, $\overline{P_{\text{max}}}$ 为子孔径-频控阵雷达发射功率的上限。

进一步的, 步骤 (4) 中求解针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型具体为:

令

$$\Phi \triangleq \frac{c^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (7);$$

$$\Lambda \triangleq \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \pi^2 D^2 \cdot \cos^2 \vartheta \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (8);$$

其中, c 为光速, ΔF_1 为第一个子阵阵元发射频率增量, ΔF_2 为第二个子阵阵元发射频率增量, N_T 为子孔径-频控阵雷达系统中的阵元个数, N_s 为每个子阵所含的阵元数目, λ 为子孔径-频控阵雷达发射信号波长, D 为每个子阵的阵元间距, ϑ 为目标相对于

子孔径-频控阵雷达的方位角， $\chi_1 = (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_T} (n-1)^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2$ ，

$$\chi_2 = (\Delta F_1 + \Delta F_2) \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 + \Delta F_2 \cdot N_S \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 ;$$

将式(7)和式(8)代入步骤(3)中的子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型中，即得到在满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值条件下，使得子孔径-频控阵雷达系统发射功率最小的发射功率值为：

$$P_{\text{rad}}^* = \min \left\{ \overline{P_{\text{max}}}, \max \left\{ \frac{\Phi \cdot \sigma_w^2}{\xi_R \cdot |\zeta|^2}, \frac{\Lambda \cdot \sigma_w^2}{\xi_g \cdot |\zeta|^2} \right\} \right\} \quad (9) ;$$

其中， P_{rad}^* 表示子孔径-频控阵雷达的发射功率 P_{rad} 的最优解， $\min\{x, y\}$ 表示求取 x 与 y 中的最小值， $\max\{k, j\}$ 表示求取 k 与 j 中的最大值， σ_w^2 为子孔径-频控阵雷达接收机的噪声功率； ξ_R 为目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值， ξ_g 为目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值， ζ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的散射系数， $\overline{P_{\text{max}}}$ 为子孔径-频控阵雷达发射功率的上限。

有益效果：与现有技术相比，本发明具有以下优点：

(1) 本发明提出了针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，该方法所完成的主要任务是针对传统频控阵雷达对目标进行参数估计时在距离向和方位向存在耦合的情况，考虑一种子孔径-频控阵雷达系统，将均匀线性雷达阵列平均分为两个子阵，每个子阵采用不同的频率增量；在此基础上，根据战场先验信息，获取目标与子孔径-频控阵雷达之间的距离以及目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角。然后，分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的估计性能。其次，以满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值为约束条件，以最小化子孔径-频控阵雷达的发射功率为优化目标，建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型，从而有效降低子孔径-频控阵雷达的发射功率，以达到提高系统射频隐身性能的目的。

该发明的优点是不仅满足了给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方

位角参数估计克拉美-罗下界阈值要求，而且有效降低了子孔径-频控阵雷达系统的发射功率，从而提高了系统的射频隐身性能。产生该优点的原因是本发明采用了针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，该方法以满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值为约束条件，以最小化子孔径-频控阵雷达的发射功率为优化目标，建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型。通过求解该优化模型，得到在满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值条件下，使得子孔径-频控阵雷达系统发射功率最小的发射功率值作为最优解，从而有效提高了子孔径-频控阵雷达系统的射频隐身性能。

(2) 与现有技术相比，本发明提出的针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，不仅满足了给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值要求，而且有效降低了子孔径-频控阵雷达系统的发射功率，从而提高了系统的射频隐身性能。

附图说明

图 1 是本发明方法的流程图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明的技术方案进行详细说明。

本发明从实际工程应用需求出发，首先针对传统频控阵雷达对目标进行参数估计时在距离向和方位向存在耦合的情况，考虑一种子孔径-频控阵雷达系统，将均匀线性雷达阵列平均分为两个子阵，每个子阵采用不同的频率增量；在此基础上，根据战场先验信息，获取目标与子孔径-频控阵雷达之间的距离以及目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角。然后，分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的估计性能。其次，以满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值为约束条件，以最小化子孔径-频控阵雷达的发射功率为优化目标，建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型，从而有效降低子孔径-频控阵雷达的发射功率，以达到提升系统射频隐身性能的目的。

如图 1 所示，针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，包括以下步骤：

- 1、确定子孔径-频控阵雷达系统组成及目标距离和方位先验信息：

针对传统频控阵雷达对目标进行参数估计时在距离向和方位向存在耦合的情况，考虑一部共由 N_T 个阵元组成的子孔径-频控阵雷达系统。该系统将均匀线性雷达阵列平均分为两个子阵，每个子阵所含的阵元数目为 N_s ，且每个子阵的阵元间距均为 D 。两个子阵采用不同的频率增量，其中，第一个子阵阵元发射频率增量为 ΔF_1 ，第二个子阵阵元发射频率增量为 ΔF_2 。子孔径-频控阵雷达发射信号波长为 λ 。

另外，根据战场先验信息，获取目标与子孔径-频控阵雷达之间的距离为 R ，目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角为 ϑ 。

2、分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的估计性能，如下所示：

子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数估计的克拉美-罗下界表达式为：

$$\text{CRB}_R = \frac{c^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_T} (n-1)^2}{8 \cdot \text{SNR} \cdot \pi^2 \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (1) ;$$

其中， c 为光速；

$$\chi_1 = (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2 \quad (2) ;$$

$$\chi_2 = (\Delta F_1 + \Delta F_2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2 + \Delta F_2 \cdot N_s \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2 \quad (3) ;$$

SNR 表示子孔径-频控阵雷达接收机的输出信噪比，可以表示为：

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{rad}} \cdot |\zeta|^2}{\sigma_w^2} \quad (4) ;$$

其中， P_{rad} 为子孔径-频控阵雷达的发射功率， ζ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的散射系数， σ_w^2 为子孔径-频控阵雷达接收机的噪声功率。

子孔径-频控阵雷达系统对目标方位角参数估计的克拉美-罗下界表达式为：

$$\text{CRB}_\vartheta = \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \text{SNR} \cdot \pi^2 D^2 \cdot \cos^2 \vartheta \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (5) ;$$

3、建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型：

根据给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值 ξ_R 和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值 ξ_g ，建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型：

$$\left. \begin{array}{l} \min_{P_{\text{rad}}} P_{\text{rad}}, \\ \text{s.t. : } \text{CRB}_R \leq \xi_R, \\ \text{CRB}_g \leq \xi_g, \\ 0 \leq P_{\text{rad}} \leq \overline{P_{\text{max}}} \end{array} \right\} \quad (6) ;$$

其中， $\overline{P_{\text{max}}}$ 为子孔径-频控阵雷达发射功率的上限。

4、对优化模型公式（6）进行求解：

令

$$\Phi \triangleq \frac{c^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (7) ;$$

$$\Lambda \triangleq \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \pi^2 D^2 \cdot \cos^2 \vartheta \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (8) ;$$

将式（7）和式（8）代入优化模型公式（6）中，即可得到在满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值条件下，使得子孔径-频控阵雷达系统发射功率最小的发射功率值为：

$$P_{\text{rad}}^* = \min \left\{ \overline{P_{\text{max}}}, \max \left\{ \frac{\Phi \cdot \sigma_w^2}{\xi_R \cdot |\zeta|^2}, \frac{\Lambda \cdot \sigma_w^2}{\xi_g \cdot |\zeta|^2} \right\} \right\} \quad (9) ;$$

其中，上标*表示最优解，即 P_{rad}^* 表示子孔径-频控阵雷达的发射功率 P_{rad} 的最优解， $\min\{x, y\}$ 表示求取 x 与 y 中的最小值， $\max\{k, j\}$ 表示求取 k 与 j 中的最大值。

描述本发明创造的工作原理及工作过程：

本发明首先针对传统频控阵雷达对目标进行参数估计时在距离向和方位向存在耦合的情况，考虑一种子孔径-频控阵雷达系统，将均匀线性雷达阵列平均分为两个子阵，每个子阵采用不同的频率增量；在此基础上，根据战场先验信息，获取目标与子孔径-频控阵雷达之间的距离以及目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角。然后，分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的

估计性能。其次，以满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值为约束条件，以最小化子孔径-频控阵雷达的发射功率为优化目标，建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型。最后，对所建立的优化模型进行求解。通过求解该优化模型，得到在满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值条件下，使得子孔径-频控阵雷达系统发射功率最小的发射功率值 P_{rad}^* 作为最优解，即可得到符合约束条件的子孔径-频控阵雷达系统射频隐身发射功率。

权 利 要 求 书

1、针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，其特征在于，包括以下步骤：

(1) 确定子孔径-频控阵雷达系统组成及目标距离和方位先验信息；

(2) 分别采用克拉美-罗下界表达式表征子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数和方位角参数的估计性能；

(3) 建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型；

(4) 求解针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型。

2、根据权利要求1所述的针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，其特征在于，步骤(1)中子孔径-频控阵雷达系统包括 N_T 个阵元，该系统将均匀线性雷达阵列平均分为两个子阵，每个子阵所含的阵元数目为 N_S ，且每个子阵的阵元间距均为 D ；两个子阵采用不同的频率增量，其中，第一个子阵阵元发射频率增量为 ΔF_1 ，第二个子阵阵元发射频率增量为 ΔF_2 ，子孔径-频控阵雷达发射信号波长为 λ ；

另外，根据战场先验信息，获取目标与子孔径-频控阵雷达之间的距离为 R ，目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角为 ϑ 。

3、根据权利要求1所述的针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法，其特征在于，步骤(2)具体为：

子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数估计的克拉美-罗下界表达式为：

$$\text{CRB}_R = \frac{c^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_T} (n-1)^2}{8 \cdot \text{SNR} \cdot \pi^2 \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (1) ;$$

其中， c 为光速，

$$\chi_1 = (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 \quad (2) ;$$

$$\chi_2 = (\Delta F_1 + \Delta F_2) \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 + \Delta F_2 \cdot N_S \cdot \sum_{n=1}^{N_S} (n-1)^2 \quad (3) ;$$

其中， ΔF_1 为第一个子阵阵元发射频率增量， ΔF_2 为第二个子阵阵元发射频率增量， N_T 为子孔径-频控阵雷达系统中的阵元个数， N_S 为每个子阵所含的阵元数目；

SNR 表示子孔径-频控阵雷达接收机的输出信噪比, 表示为:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{rad}} \cdot |\zeta|^2}{\sigma_w^2} \quad (4);$$

其中, P_{rad} 为子孔径-频控阵雷达的发射功率, ζ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的散射系数, σ_w^2 为子孔径-频控阵雷达接收机的噪声功率;

子孔径-频控阵雷达系统对目标方位角参数估计的克拉美-罗下界表达式为:

$$\text{CRB}_g = \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \text{SNR} \cdot \pi^2 D^2 \cdot \cos^2 \vartheta \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (5);$$

其中, λ 为子孔径-频控阵雷达发射信号波长, D 为每个子阵的阵元间距, ϑ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角。

4、根据权利要求 1 所述的针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法, 其特征在于, 步骤 (3) 中根据给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值 ξ_R 和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值 ξ_g , 建立针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型:

$$\left. \begin{array}{l} \min P_{\text{rad}}, \\ \text{s.t.: } \text{CRB}_R \leq \xi_R, \\ \text{CRB}_g \leq \xi_g, \\ 0 \leq P_{\text{rad}} \leq \overline{P_{\text{max}}}. \end{array} \right\} \quad (6);$$

其中, P_{rad} 为子孔径-频控阵雷达的发射功率, CRB_R 为子孔径-频控阵雷达系统对目标距离参数估计的克拉美-罗下界, CRB_g 为子孔径-频控阵雷达系统对目标方位角参数估计的克拉美-罗下界, $\overline{P_{\text{max}}}$ 为子孔径-频控阵雷达发射功率的上限。

5、根据权利要求 1 所述的针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化方法, 其特征在于, 步骤 (4) 中求解针对子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型具体为:

令

$$\Phi \triangleq \frac{c^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (7) ;$$

$$\Lambda \triangleq \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2}{8 \cdot \pi^2 D^2 \cdot \cos^2 \vartheta \cdot (\chi_1 - \chi_2^2)} \quad (8) ;$$

其中, c 为光速, ΔF_1 为第一个子阵阵元发射频率增量, ΔF_2 为第二个子阵阵元发射频率增量, N_T 为子孔径-频控阵雷达系统中的阵元个数, N_s 为每个子阵所含的阵元数目, λ 为子孔径-频控阵雷达发射信号波长, D 为每个子阵的阵元间距, ϑ 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的方位角, $\chi_1 = (\Delta F_1^2 + \Delta F_2^2) \cdot \sum_{n=1}^{N_T} (n-1)^2 \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2$, $\chi_2 = (\Delta F_1 + \Delta F_2) \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2 + \Delta F_2 \cdot N_s \cdot \sum_{n=1}^{N_s} (n-1)^2$;

将式 (7) 和式 (8) 代入步骤 (3) 中的子孔径-频控阵雷达的射频隐身发射功率优化模型中, 即得到在满足给定的目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值和目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值条件下, 使得子孔径-频控阵雷达系统发射功率最小的发射功率值为:

$$P_{\text{rad}}^* = \min \left\{ \overline{P_{\text{max}}}, \max \left\{ \frac{\Phi \cdot \sigma_w^2}{\xi_R \cdot |\varsigma|^2}, \frac{\Lambda \cdot \sigma_w^2}{\xi_\vartheta \cdot |\varsigma|^2} \right\} \right\} \quad (9) ;$$

其中, P_{rad}^* 表示子孔径-频控阵雷达的发射功率 P_{rad} 的最优解, $\min\{x, y\}$ 表示求取 x 与 y 中的最小值, $\max\{k, j\}$ 表示求取 k 与 j 中的最大值, σ_w^2 为子孔径-频控阵雷达接收机的噪声功率; ξ_R 为目标距离参数估计克拉美-罗下界阈值, ξ_ϑ 为目标方位角参数估计克拉美-罗下界阈值, ς 为目标相对于子孔径-频控阵雷达的散射系数, $\overline{P_{\text{max}}}$ 为子孔径-频控阵雷达发射功率的上限。

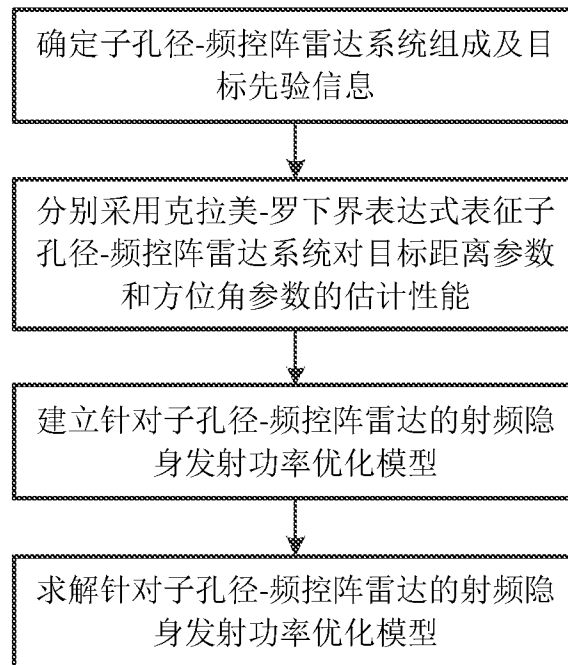


图 1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/070302

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 7/40(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT; CNKI; WPI; EPODOC: 南京航空航天大学, 时晨光, 丁琳涛, 王奕杰, 子孔径, 频控阵, 雷达, 射频, 隐身, 发射功率, 优化, 目标, 距离, 方位, 克拉美罗下界, 模型, 最小, 最优解, sub-aperture, frequency diverse array, FDA, radar, RF, radio frequency, stealth, transmitting power, target, distance, azimuth, Cramer-Rao lower bound, CRLB, minimum, optimization

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111693950 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 22 September 2020 (2020-09-22) description, paragraphs [0046]-[0074], figure 1	1-5
A	WANG, Yongbing et al. "Optimal Frequency Diverse Subarray Design With Cramér-Rao Lower Bound Minimization" <i>IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS</i> , Vol. 14, 26 January 2015 (2015-01-26), ISSN: 1536-1225, Abstract, section II, site B	1-5
A	CN 109672488 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 23 April 2019 (2019-04-23) entire document	1-5
A	CN 105044689 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 11 November 2015 (2015-11-11) entire document	1-5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

05 March 2021

Date of mailing of the international search report

29 March 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/070302

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	吴炜霞 等 (WU, Weixia et al.). "基于频控阵实现的射频隐身技术应用探讨 (Discussion on Application of RF Stealth Technology Based on Frequency Control Array)" <i>航天电子对抗 (Aerospace Electronic Warfare)</i> , Vol. 35, No. 3, 30 June 2019 (2019-06-30), ISSN: 1673-2421, entire document	1-5
A	GUI, Ronghua et al. "Cognitive Target Tracking via Angle-Range-Doppler Estimation With Transmit Subaperturing FDA Radar" <i>IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING</i> , Vol. 12, No. 1, 28 February 2018 (2018-02-28), ISSN: 1932-4553, entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/070302

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	111693950	A	22 September 2020	None	
CN	109672488	A	23 April 2019	None	
CN	105044689	A	11 November 2015	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/070302

A. 主题的分类 G01S 7/40 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01S 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT; CNKI; WPI; EP000C: 南京航空航天大学, 时晨光, 丁琳涛, 王奕杰, 子孔径, 频控阵, 雷达, 射频, 隐身, 发射功率, 优化, 目标, 距离, 方位, 克拉美罗下界, 模型, 最小, 最优解, sub-aperture, frequency diverse array, FDA, radar, RF, radio frequency, stealth, transmitting power, target, distance, azimuth, Cramer-Rao lower bound, CRLB, minimum, optimization																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 111693950 A (南京航空航天大学) 2020年 9月 22日 (2020 - 09 - 22) 说明书第[0046]-[0074]段、图1</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WANG, Yongbing 等. "Optimal Frequency Diverse Subarray Design With Cramer-Rao Lower Bound Minimization" IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, 第14卷, 2015年 1月 26日 (2015 - 01 - 26), ISSN: 1536-1225, Abstract、第II节B点</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109672488 A (南京航空航天大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105044689 A (电子科技大学) 2015年 11月 11日 (2015 - 11 - 11) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>吴炜霞 等. "基于频控阵实现的射频隐身技术应用探讨" 航天电子对抗, 第35卷, 第3期, 2019年 6月 30日 (2019 - 06 - 30), ISSN: 1673-2421, 全文</td> <td>1-5</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 111693950 A (南京航空航天大学) 2020年 9月 22日 (2020 - 09 - 22) 说明书第[0046]-[0074]段、图1	1-5	A	WANG, Yongbing 等. "Optimal Frequency Diverse Subarray Design With Cramer-Rao Lower Bound Minimization" IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, 第14卷, 2015年 1月 26日 (2015 - 01 - 26), ISSN: 1536-1225, Abstract、第II节B点	1-5	A	CN 109672488 A (南京航空航天大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 全文	1-5	A	CN 105044689 A (电子科技大学) 2015年 11月 11日 (2015 - 11 - 11) 全文	1-5	A	吴炜霞 等. "基于频控阵实现的射频隐身技术应用探讨" 航天电子对抗, 第35卷, 第3期, 2019年 6月 30日 (2019 - 06 - 30), ISSN: 1673-2421, 全文	1-5
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 111693950 A (南京航空航天大学) 2020年 9月 22日 (2020 - 09 - 22) 说明书第[0046]-[0074]段、图1	1-5																		
A	WANG, Yongbing 等. "Optimal Frequency Diverse Subarray Design With Cramer-Rao Lower Bound Minimization" IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, 第14卷, 2015年 1月 26日 (2015 - 01 - 26), ISSN: 1536-1225, Abstract、第II节B点	1-5																		
A	CN 109672488 A (南京航空航天大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 全文	1-5																		
A	CN 105044689 A (电子科技大学) 2015年 11月 11日 (2015 - 11 - 11) 全文	1-5																		
A	吴炜霞 等. "基于频控阵实现的射频隐身技术应用探讨" 航天电子对抗, 第35卷, 第3期, 2019年 6月 30日 (2019 - 06 - 30), ISSN: 1673-2421, 全文	1-5																		
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																		
2021年 3月 5日		2021年 3月 29日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址		授权官员																		
中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		周璐璐 电话号码 86-(10)-53962589																		

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	GUI, Ronghua 等. "Cognitive Target Tracking via Angle-Range-Doppler Estimation With Transmit Subaperturing FDA Radar" IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING, 第12卷, 第1期, 2018年 2月 28日 (2018 - 02 - 28), ISSN: 1932-4553, 全文	1-5

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/070302

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111693950	A	2020年 9月 22日	无	
CN	109672488	A	2019年 4月 23日	无	
CN	105044689	A	2015年 11月 11日	无	