

(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
2022 年 2 月 24 日 (24.02.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/036733 A1

(51) 国际专利分类号:
G01S 13/87 (2006.01) *G01S 7/282* (2006.01)
G01S 13/72 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/111323

(22) 国际申请日: 2020 年 8 月 26 日 (26.08.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010842153.6 2020年8月20日 (20.08.2020) 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)。

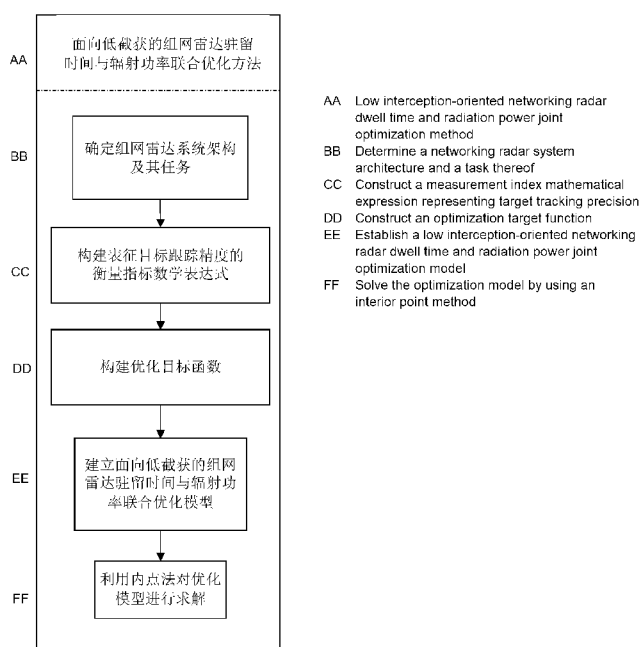
(72) 发明人: 时晨光 (SHI, Chenguang); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。丁琳涛 (DING, Lintao); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。王奕杰 (WANG, Yijie); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。周建江 (ZHOU, Jianjiang); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。

(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,

(54) Title: LOW INTERCEPTION-ORIENTED NETWORKING RADAR DWELL TIME AND RADIATION POWER JOINT OPTIMIZATION METHOD

(54) 发明名称: 面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法



(57) Abstract: A low interception-oriented networking radar dwell time and radiation power joint optimization method, comprising S1, determining a networking radar system architecture and a task thereof; S2, taking dwell time and radiation power of radars as independent variables, constructing a prediction Bayesian Cramer-Rao lower bound matrix of a target state estimation error, and taking a trace of the prediction Bayesian Cramer-Rao lower bound matrix as a measurement index of target tracking precision; S3, taking a weighted sum F_k of dwell time resources and radiation power resources of radar irradiation targets at a moment k as an optimization

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, 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))。

target function; S4, establishing a low interception-oriented networking radar dwell time and radiation power joint optimization model; and S5, solving the low interception-oriented networking radar dwell time and radiation power joint optimization model by using an interior point method. Radio frequency radiation resource consumption of a networking radar system is reduced, and the low interception performance of the networking radar system is effectively improved.

(57) 摘要: 面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法, 包括S1、确定组网雷达系统架构及其任务; S2、以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量, 构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵, 取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标; S3、以k时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和Fk为优化目标函数; S4、建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型; S5、利用内点法对面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型进行求解。降低了组网雷达系统的射频辐射资源消耗, 有效提升了其低截获性能。

面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法

技术领域

本发明涉及雷达信号处理的技术，具体涉及面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法。

背景技术

近年来，组网雷达系统如多基地雷达和多输入多输出雷达等引起了学术界的广泛关注。与传统的单基地雷达系统相比，组网雷达系统具有诸多潜在优势，如优越的波形分集增益、空间分集增益和更好的目标检测跟踪性能等。

对于组网雷达系统在目标跟踪下的资源分配问题，国内外学者提出了一系列资源分配管理方法，目的是充分地利用系统潜力，提升系统性能。根据优化目标，这些方法可以分为两类。第一类是在组网雷达系统有限的发射资源约束下，尽可能的提高目标的跟踪精度。第二类是在满足目标跟踪精度要求的前提下，最小化组网雷达系统的辐射资源消耗。

在现代作战环境中，随着无源探测设备的广泛使用，低截获技术是组网雷达系统必须着重考虑的问题。然而，现有技术中尚未有面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法。

发明内容

发明目的：本发明的目的是提供一种面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法。

技术方案：本发明的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法，包括以下步骤：

S1、确定组网雷达系统架构及其任务；

S2、以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量，构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵，取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标；

S3、以 k 时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和 F_k 为优化目标函数；

S4、建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型；

S5、利用内点法对面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型进行求解。

进一步的，步骤 S1 中考虑有 N_{rad} 部单基地相控阵雷达构成的组网雷达系统对单目标进行跟踪，这些雷达分散部署于二维空间中并保持时间、空间、频率同步，且每部雷达只能接收并处理来自自身发射信号的目标回波。

进一步的，步骤 S2 具体为：

目标的贝叶斯信息矩阵计算表达式为：

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}) = \left[\mathbf{Q} + \mathbf{F} \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}_{k|k-1}) \mathbf{F}^T \right]^{-1} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[\left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right)^T \left(\Psi_{i,k|k-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right) \right]_{\mathbf{X}_{k|k-1}} ;$$

其中， $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的逆运算， $\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1})$ 为目标的贝叶斯信息矩阵；

$\mathbf{X}_{k|k-1} = [x_{k|k-1}, y_{k|k-1}, \hat{x}_{k|k-1}, \hat{y}_{k|k-1}]^T$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标状态向量，其中， $(\cdot)^T$ 表示矩阵或矢量的转置运算， $(x_{k|k-1}, y_{k|k-1})$ 表示 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标位置， $(\hat{x}_{k|k-1}, \hat{y}_{k|k-1})$ 表示 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标运动速度， N_{rad} 表示单基地相控阵雷达的数量； $\mathbf{Q}$ 为过程噪声协方差矩阵，其数学表达式为：

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{(\Delta T_0)^3}{3} & \frac{(\Delta T_0)^2}{2} \\ \frac{(\Delta T_0)^2}{2} & \Delta T_0 \end{bmatrix} \otimes r \mathbf{I}_2 ;$$

其中， ΔT_0 为采样间隔， $\otimes$ 表示矩阵直积运算， $\mathbf{I}_2$ 为 2 阶单位矩阵， r 为过程噪声强度； $\mathbf{F}$ 为目标状态转移矩阵，其数学表达式为：

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_2 ;$$

$\mathbf{G}_{i,k|k-1} = \left[\nabla_{\mathbf{X}_{k|k-1}} \left(g_i(\mathbf{X}_{k|k-1}) \right) \right]^T$ 为第 i 部雷达量测函数 $g_i(\mathbf{X}_{k|k-1})$ 的雅克比矩阵，其中，

$\nabla_{\mathbf{X}_{k|k-1}}$ 表示对目标状态向量 $\mathbf{X}_{k|k-1}$ 求一阶偏导，第 i 部雷达量测函数 $g_i(\mathbf{X}_{k|k-1})$ 的数学表达式为：

$$g_i(\mathbf{X}_{k|k-1}) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_{k|k-1} - x_i)^2 + (y_{k|k-1} - y_i)^2} \\ \arctan\left(\frac{y_{k|k-1} - y_i}{x_{k|k-1} - x_i}\right) \end{bmatrix} ;$$

其中, (x_i, y_i) 为第 i 部雷达在二维空间中的位置坐标; $\Psi_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达的量测噪声协方差矩阵, 其数学表达式为:

$$\Psi_{i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{R,k|k-1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varphi,k|k-1}^2 \end{bmatrix} ;$$

其中, $\sigma_{R,k|k-1}^2$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标距离量测误差, $\sigma_{\varphi,k|k-1}^2$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标方位角量测误差, 其数学表达式分别为:

$$\sigma_{R,k|k-1}^2 = \frac{c^2}{(4\pi)^2 \beta \text{SNR}_{i,k|k-1}} ;$$

$$\sigma_{\varphi,k|k-1}^2 = \frac{3\lambda^2}{\pi^2 \gamma^2 \text{SNR}_{i,k|k-1}} ;$$

其中, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$, β 为雷达发射信号有效带宽, λ 为雷达工作波长, γ 为天线孔径, $\text{SNR}_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标回波信噪比, 其数学表达式为:

$$\text{SNR}_{i,k|k-1} = \frac{T_{d,i,k}}{T_r} \cdot \frac{P_{i,k} G_t G_r \sigma_i \lambda^2 G_{\text{RP}}}{(4\pi)^3 k_0 T_0 B_r F_r (R_{i,k|k-1})^4} \cdot \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\tilde{\alpha}_i)^2}{\theta_{3\text{dB}}^2}\right] ;$$

其中, $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率, T_r 为各雷达脉冲重复周期, G_t 和 G_r 分别为各雷达发射天线增益和接收天线增益, σ_i 为目标相对第 i 部雷达的雷达散射截面, G_{RP} 为雷达接收机处理增益, k_0 和 T_0 分别为玻尔兹曼常数和各雷达接收机噪声温度, B_r 为各雷达接收机匹配滤波器带宽, F_r 为各雷达接收机噪声系数, $R_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达 $k-1$ 时刻预测 k 时刻与目标之间的距离, $\tilde{\alpha}_i$ 为目标的真实方位角与第 i 部雷达发射波束之间的角度差, $\theta_{3\text{dB}}$ 为各雷达天线 3dB 波束宽度;

对目标的贝叶斯信息矩阵计算表达式求逆, 即得到目标运动状态估计误差的预测

贝叶斯克拉美-罗下界矩阵，其数学表达式为：

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{k|k-1} &= \left[\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}) \right]^{-1} \\ &= \left\{ \left[\mathbf{Q} + \mathbf{FJ}^{-1}(\mathbf{X}_{k|k-1})\mathbf{F}^T \right]^{-1} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[\left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right)^T \left(\boldsymbol{\Psi}_{i,k|k-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right) \right] \right\}_{\mathbf{X}_{k|k-1}}^{-1} ; \end{aligned}$$

在此，采用预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵 $\mathbf{C}_{k|k-1}$ 的迹来表征目标跟踪精度 $Q_{k|k-1}$ ，即：

$$Q_{k|k-1} = \text{Tr}(\mathbf{C}_{k|k-1}) ;$$

其中， $\text{Tr}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹运算。

进一步的，步骤 S3 中优化目标函数 F_k 的数学表达式为：

$$F_k = \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k} - T_{d,\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \xi \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k} - P_{\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (P_{\max} - P_{\min})} ;$$

其中， α 和 ξ 分别为驻留时间和辐射功率的权重系数， $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率， $T_{d,\min}$ 和 $T_{d,\max}$ 分别为各雷达驻留时间的下限和上限， $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为各雷达辐射功率的下限和上限， N_{rad} 表示单基地相控阵雷达的数量。

进一步的，步骤 S4 中以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件，以最小化各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标，建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型，如下所示：

$$\left. \begin{aligned} \min_{T_{d,i,k}, P_{i,k}} F_k &= \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k} - T_{d,\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \xi \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k} - P_{\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (P_{\max} - P_{\min})}, \\ \text{s.t.} : Q_{k|k-1} &\leq Q_{\max}, \\ T_{d,\min} &\leq T_{d,i,k} \leq T_{d,\max}, \\ P_{\min} &\leq P_{i,k} \leq P_{\max}. \end{aligned} \right\} ;$$

其中， F_k 为各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标， α

和 ξ 分别为驻留时间和辐射功率的权重系数, N_{rad} 表示单基地相控阵雷达的数量, $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率, $T_{d,\min}$ 和 $T_{d,\max}$ 分别为各雷达驻留时间的下限和上限, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为各雷达辐射功率的下限和上限, $Q_{k|k-1}$ 为目标跟踪精度, $Q_{\max}$ 为预先设定的目标跟踪误差阈值。

进一步的, 步骤 S5 中采用 MATLAB 软件中的 fmincon 函数对面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型进行计算求解, 所得即为 k 时刻第 i 部雷达的最优驻留时间 $T_{d,i,k}^*$ 与辐射功率 $P_{i,k}^*$, 其中, $(\cdot)^*$ 表示参数的最优值。

有益效果: 与现有技术相比, 本发明方法所完成的主要任务是考虑有多部单基地相控阵雷达构成的组网雷达系统对单目标进行跟踪, 这些雷达分散部署于二维空间中并保持时间、空间、频率同步, 且每部雷达只能接收并处理来自自身发射信号的目标回波。首先, 以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量, 构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵, 取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标; 其次, 以各时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标函数; 在此基础上, 以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件, 以最小化各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标, 建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型, 从而降低组网雷达系统的射频辐射资源消耗, 有效提升其低截获性能。

该发明的优点是不仅能够满足预先设定的目标跟踪精度性能要求及组网雷达系统辐射资源, 而且能够降低组网雷达系统的射频辐射资源消耗, 从而提升其低截获性能。产生该优点的原因是本发明采用了面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法。

附图说明

图 1 为面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法流程图;

图 2 为目标运动轨迹与组网雷达几何位置关系图;

图 3 为组网雷达驻留时间与辐射功率分配图;

图 4 为不同方法下目标跟踪均方根误差对比曲线;

图 5 为不同方法下组网雷达总驻留时间与总辐射功率对比曲线;

图6为组网雷达总驻留时间节省率、总辐射功率节省率与优化目标函数减小率图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

本发明从当今军事应用需求出发,提出了面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法,以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件,以最小化各时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标,建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型,从而降低了组网雷达系统的射频辐射资源消耗,有效提升了其低截获性能。

如图1所示,本发明的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法,包括以下步骤:

S1、确定组网雷达系统架构及其任务;

考虑有 N_{rad} 部单基地相控阵雷达构成的组网雷达系统对单目标进行跟踪,这些雷达分散部署于二维空间中并保持时间、空间、频率同步,且每部雷达只能接收并处理来自自身发射信号的目标回波。

S2、以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量,构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵,取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标,如下所示:

目标的贝叶斯信息矩阵计算表达式为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}) = [\mathbf{Q} + \mathbf{F}\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k-1|k-1})\mathbf{F}^T]^{-1} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[(\mathbf{G}_{i,k|k-1})^T (\boldsymbol{\Psi}_{i,k|k-1})^{-1} (\mathbf{G}_{i,k|k-1}) \right]_{\mathbf{X}_{k|k-1}} \quad (1);$$

其中, $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的逆运算, $\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1})$ 为目标的贝叶斯信息矩阵;

$\mathbf{X}_{k|k-1} = [x_{k|k-1}, y_{k|k-1}, \hat{x}_{k|k-1}, \hat{y}_{k|k-1}]^T$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标状态向量,其中, $(\cdot)^T$ 表示矩阵或矢量的转置运算, $(x_{k|k-1}, y_{k|k-1})$ 表示 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标位置, $(\hat{x}_{k|k-1}, \hat{y}_{k|k-1})$ 表示 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标运动速度; $\mathbf{Q}$ 为过程噪声协方差矩阵,其数学表达式为:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{(\Delta T_0)^3}{3} & \frac{(\Delta T_0)^2}{2} \\ \frac{(\Delta T_0)^2}{2} & \Delta T_0 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_2 \quad (2);$$

其中, ΔT_0 为采样间隔, $\otimes$ 表示矩阵直积运算, $\mathbf{I}_2$ 为 2 阶单位矩阵, r 为过程噪声强度; $\mathbf{F}$ 为目标状态转移矩阵, 其数学表达式为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_2 \quad (3);$$

$\mathbf{G}_{i,k|k-1} = \left[\nabla_{\mathbf{x}_{k|k-1}} \left(g_i(\mathbf{x}_{k|k-1}) \right) \right]^T$ 为第 i 部雷达量测函数 $g_i(\mathbf{x}_{k|k-1})$ 的雅克比矩阵, 其中, $\nabla_{\mathbf{x}_{k|k-1}}$ 表示对目标状态向量 $\mathbf{x}_{k|k-1}$ 求一阶偏导, 第 i 部雷达量测函数 $g_i(\mathbf{x}_{k|k-1})$ 的数学表达式为:

$$g_i(\mathbf{x}_{k|k-1}) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_{k|k-1} - x_i)^2 + (y_{k|k-1} - y_i)^2} \\ \arctan\left(\frac{y_{k|k-1} - y_i}{x_{k|k-1} - x_i}\right) \end{bmatrix} \quad (4);$$

其中, (x_i, y_i) 为第 i 部雷达在二维空间中的位置坐标; $\Psi_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达的量测噪声协方差矩阵, 其数学表达式为:

$$\Psi_{i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{R,k|k-1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varphi,k|k-1}^2 \end{bmatrix} \quad (5);$$

其中, $\sigma_{R,k|k-1}^2$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标距离量测误差, $\sigma_{\varphi,k|k-1}^2$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标方位角量测误差, 其数学表达式分别为:

$$\sigma_{R,k|k-1}^2 = \frac{c^2}{(4\pi)^2 \beta \text{SNR}_{i,k|k-1}} \quad (6);$$

$$\sigma_{\varphi,k|k-1}^2 = \frac{3\lambda^2}{\pi^2 \gamma^2 \text{SNR}_{i,k|k-1}} \quad (7);$$

其中, $c = 3 \times 10^8$ m/s, β 为雷达发射信号有效带宽, λ 为雷达工作波长, γ 为天线孔径, $\text{SNR}_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标回波信噪比, 其数学表达式为:

$$\text{SNR}_{i,k|k-1} = \frac{T_{d,i,k}}{T_r} \cdot \frac{P_{i,k} G_t G_r \sigma_i \lambda^2 G_{RP}}{(4\pi)^3 k_0 T_0 B_r F_r (R_{i,k|k-1})^4} \cdot \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\tilde{\alpha}_i)^2}{\theta_{3\text{dB}}^2} \right] \quad (8);$$

其中, $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率, T_r 为各雷达脉冲重复周期, G_t 和 G_r 分别为各雷达发射天线增益和接收天线增益, σ_i 为目标相对第 i 部雷达的雷达散射截面, G_{RP} 为雷达接收机处理增益, k_0 和 T_0 分别为玻尔兹曼常数和各雷达接收机噪声温度, B_r 为各雷达接收机匹配滤波器带宽, F_r 为各雷达接收机噪声系数, $R_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达 $k-1$ 时刻预测 k 时刻与目标之间的距离, $\tilde{\alpha}_i$ 为目标的真实方位角与第 i 部雷达发射波束之间的角度差, θ_{3dB} 为各雷达天线 3dB 波束宽度。

对式 (1) 求逆, 即可得到目标运动状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵, 其数学表达式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{k|k-1} &= [\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1})]^{-1} \\ &= \left\{ \left[\mathbf{Q} + \mathbf{FJ}^{-1}(\mathbf{X}_{k|k-1})\mathbf{F}^T \right]^{-1} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[\left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right)^T \left(\Psi_{i,k|k-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right) \right]_{\mathbf{X}_{k|k-1}} \right\}^{-1} \quad (9); \end{aligned}$$

在此, 采用预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵 $\mathbf{C}_{k|k-1}$ 的迹来表征目标跟踪精度 $Q_{k|k-1}$, 即:

$$Q_{k|k-1} = \text{Tr}(\mathbf{C}_{k|k-1}) \quad (10);$$

其中, $\text{Tr}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹运算。

S3、以 k 时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和 F_k 为优化目标函数, 其数学表达式为:

$$F_k = \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k} - T_{d,\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \xi \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k} - P_{\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (P_{\max} - P_{\min})} \quad (11);$$

其中, α 和 ξ 分别为驻留时间和辐射功率的权重系数, $T_{d,\min}$ 和 $T_{d,\max}$ 分别为各雷达驻留时间的下限和上限, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为各雷达辐射功率的下限和上限。

S4、建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型, 如下所示:

以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件, 以最小化各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目

标，建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型，如下所示：

$$\left. \begin{aligned} \min_{T_{d,i,k}, P_{i,k}} F_k &= \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k} - T_{d,\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \xi \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k} - P_{\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (P_{\max} - P_{\min})}, \\ \text{s.t.} : Q_{k|k-1} &\leq Q_{\max}, \\ T_{d,\min} &\leq T_{d,i,k} \leq T_{d,\max}, \\ P_{\min} &\leq P_{i,k} \leq P_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (12);$$

其中， $Q_{\max}$ 为预先设定的目标跟踪误差阈值。

S5、利用内点法对优化模型（12）进行求解：

对于优化模型（12），可采用 MATLAB 软件中的 fmincon 函数进行计算求解，所得即为 k 时刻第 i 部雷达的最优驻留时间 $T_{d,i,k}^*$ 与辐射功率 $P_{i,k}^*$ ，其中， $(\bullet)^*$ 表示参数的最优值。

仿真结果：

考虑由 $N_{\text{rad}} = 4$ 部雷达组成的组网雷达系统跟踪单目标的场景，系统中每部雷达的发射参数均相同，有效带宽为 $\beta = 1\text{MHz}$ ，工作波长为 $\lambda = 0.03\text{m}$ ，采样间隔为 $\Delta T_0 = 3\text{s}$ 。目标相对各雷达的雷达散射截面均设为 1m^2 。雷达照射目标的驻留时间上、下限分别为 $T_{d,\max} = 0.1\text{s}$ 和 $T_{d,\min} = 0.0005\text{s}$ ，雷达辐射功率上、下限分别为 $P_{\max} = 2800\text{W}$ 和 $P_{\min} = 50\text{W}$ 。目标跟踪误差阈值设为 $Q_{\max} = 1000\text{m}^2$ 。假设目标跟踪过程持续时间为 150s ，两个目标的过程噪声强度均为 15。

图 2 示出了目标运动轨迹与组网雷达几何位置关系图。从图 2 中可以看出，本发明所提方法能够较好地对目标进行跟踪。

图 3 示出了组网雷达驻留时间与辐射功率分配图。从图 3（a）和（b）中可以看出，组网雷达将优先选择与目标距离较近且相对位置较好的雷达对该目标进行照射；同时，更多的驻留时间资源和辐射功率资源会分配给距离目标较远且相对位置较差的雷达，从而保证组网雷达系统的射频总辐射资源消耗最少。

定义目标跟踪均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）的数学表达式为：

$$\text{RMSE}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{MC}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{MC}}} \left\{ \left[x_k - \tilde{x}_{n,k|k} \right]^2 + \left[y_k - \tilde{y}_{n,k|k} \right]^2 \right\}} \quad (13);$$

式中, N_{MC} 为蒙特卡洛实验次数, (x_k, y_k) 为 k 时刻目标的真实位置, $(\tilde{x}_{n,k|k}, \tilde{y}_{n,k|k})$ 为第 n 次蒙特卡洛实验时得到的 k 时刻目标估计位置, 在此, 设 $N_{MC} = 500$ 。本发明以驻留时间和辐射功率均匀分配算法 (以下简称 “均匀分配算法”) 为对比算法来验证本发明所提方法的优劣。图 4 示出了不同方法下目标跟踪均方根误差对比曲线。从图 4 中可以看出, 本发明所提方法能够较好地满足目标跟踪精度要求。

图 5 示出了不同方法下组网雷达总驻留时间与总辐射功率对比曲线, 其中, 图 5 (a) 示出了不同方法下组网雷达总驻留时间对比曲线, 图 5 (b) 示出了不同方法下组网雷达总辐射功率对比曲线。从图 5 中可以看出, 与均匀分配算法相比, 本发明所提方法能够在满足目标跟踪精度相近的条件下, 显著减少组网雷达的总驻留时间资源和总辐射功率资源消耗, 提升系统的低截获性能。

定义 k 时刻组网雷达系统的总驻留时间节省率 ρ_{t_k} 、总辐射功率节省率 ρ_{p_k} 与优化目标函数值的减小率 ρ_k 分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{t_k} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{rad}} T_{s,i,k}^{opt}}{\sum_{i=1}^{N_{rad}} T_{s,i,k}^{uni}} \\ \rho_{p_k} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{rad}} P_{s,i,k}^{opt}}{\sum_{i=1}^{N_{rad}} P_{s,i,k}^{uni}} \\ \rho_k = 1 - \frac{F_k^{opt}}{F_k^{uni}} \end{array} \right. \quad (14);$$

式中, $T_{s,i,k}^{opt}$ 和 $P_{s,i,k}^{opt}$ 分别为本发明所提方法在 k 时刻第 i 部雷达对目标照射的驻留时间和辐射功率; $T_{s,i,k}^{uni}$ 和 $P_{s,i,k}^{uni}$ 分别为均匀分配算法在 k 时刻第 i 部雷达对目标照射的驻留时间和辐射功率; F_k^{opt} 表示本发明所提方法在 k 时刻的目标函数值, F_k^{uni} 表示均匀分配算法在 k 时刻的目标函数值。图 6 示出了组网雷达总驻留时间节省率、总辐射功率节省率与优化目标函数减小率图, 其中, 图 6 (a) 示出了组网雷达总驻留时间节省率图, 图 6 (b) 示出了组网雷达总辐射功率节省率图, 图 6 (c) 示出了组网雷达优化目标函数减小率图。从图 6 中可以看出, 相比于均匀分配算法, 本发明所提方法不仅有效减少了组网雷达系统的射频辐射资源消耗, 而且降低了优化目标函数值, 从而提升了组网雷达系统的低截

获性能。

本发明创造的工作原理及工作过程：

本发明考虑有多部单基地相控阵雷达构成的组网雷达系统对单目标进行跟踪，这些雷达分散部署于二维空间中并保持时间、空间、频率同步，且每部雷达只能接收并处理来自自身发射信号的目标回波。首先，以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量，构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵，取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标；其次，以各时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标函数；在此基础上，以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件，以最小化各时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标，建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型；从而降低组网雷达系统的射频辐射资源消耗，有效提升其低截获性能；最后，采用内点法对上述优化模型进行求解，即可得到符合约束条件的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化分配结果。

本发明创造的发明点：

1、针对由多部单基地相控阵雷达构成的组网雷达系统对单目标进行跟踪，这些雷达分散部署于二维空间中并保持时间、空间、频率同步，且每部雷达只能接收并处理来自自身发射信号的目标回波；以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量，构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵，取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标；以各时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标函数；

2、以各时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标函数；在此基础上，以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件，以最小化各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标，建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型，并采用内点法对该优化模型进行求解，确定使得组网雷达系统目标函数最小的驻留时间和辐射功率作为最优解。

权 利 要 求 书

1、面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法，其特征在于，包括以下步骤：

S1、确定组网雷达系统架构及其任务；

S2、以各雷达驻留时间和辐射功率为自变量，构造目标状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵，取预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵的迹作为目标跟踪精度的衡量指标；

S3、以 k 时刻各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和 F_k 为优化目标函数；

S4、建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型；

S5、利用内点法对面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型进行求解。

2、根据权利要求 1 所述的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法，其特征在于，步骤 S1 中考虑有 N_{rad} 部单基地相控阵雷达构成的组网雷达系统对单目标进行跟踪，这些雷达分散部署于二维空间中并保持时间、空间、频率同步，且每部雷达只能接收并处理来自自身发射信号的目标回波。

3、根据权利要求 1 所述的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法，其特征在于，步骤 S2 具体为：

目标的贝叶斯信息矩阵计算表达式为：

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}) = \left[\mathbf{Q} + \mathbf{F}\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}_{k|k-1})\mathbf{F}^T \right]^{-1} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[\left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right)^T \left(\boldsymbol{\Psi}_{i,k|k-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right) \right]_{\mathbf{X}_{k|k-1}} ;$$

其中， $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的逆运算， $\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1})$ 为目标的贝叶斯信息矩阵；

$\mathbf{X}_{k|k-1} = [x_{k|k-1}, y_{k|k-1}, \hat{x}_{k|k-1}, \hat{y}_{k|k-1}]^T$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标状态向量，其中， $(\cdot)^T$ 表示矩阵或矢量的转置运算， $(x_{k|k-1}, y_{k|k-1})$ 表示 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标位置， $(\hat{x}_{k|k-1}, \hat{y}_{k|k-1})$ 表示 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标运动速度， N_{rad} 表示单基地相控阵雷达的数量； $\mathbf{Q}$ 为过程噪声协方差矩阵，其数学表达式为：

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{(\Delta T_0)^3}{3} & \frac{(\Delta T_0)^2}{2} \\ \frac{(\Delta T_0)^2}{2} & \Delta T_0 \end{bmatrix} \otimes r \mathbf{I}_2 ;$$

其中, ΔT_0 为采样间隔, $\otimes$ 表示矩阵直积运算, $\mathbf{I}_2$ 为 2 阶单位矩阵, r 为过程噪声强度; $\mathbf{F}$ 为目标状态转移矩阵, 其数学表达式为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_2 ;$$

$\mathbf{G}_{i,k|k-1} = \left[\nabla_{\mathbf{x}_{k|k-1}} \left(g_i(\mathbf{x}_{k|k-1}) \right) \right]^T$ 为第 i 部雷达量测函数 $g_i(\mathbf{x}_{k|k-1})$ 的雅克比矩阵, 其中, $\nabla_{\mathbf{x}_{k|k-1}}$ 表示对目标状态向量 $\mathbf{x}_{k|k-1}$ 求一阶偏导, 第 i 部雷达量测函数 $g_i(\mathbf{x}_{k|k-1})$ 的数学表达式为:

$$g_i(\mathbf{x}_{k|k-1}) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_{k|k-1} - x_i)^2 + (y_{k|k-1} - y_i)^2} \\ \arctan \left(\frac{y_{k|k-1} - y_i}{x_{k|k-1} - x_i} \right) \end{bmatrix} ;$$

其中, (x_i, y_i) 为第 i 部雷达在二维空间中的位置坐标; $\Psi_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达的量测噪声协方差矩阵, 其数学表达式为:

$$\Psi_{i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{R,k|k-1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varphi,k|k-1}^2 \end{bmatrix} ;$$

其中, $\sigma_{R,k|k-1}^2$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标距离量测误差, $\sigma_{\varphi,k|k-1}^2$ 为 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标方位角量测误差, 其数学表达式分别为:

$$\sigma_{R,k|k-1}^2 = \frac{c^2}{(4\pi)^2 \beta \text{SNR}_{i,k|k-1}} ;$$

$$\sigma_{\varphi,k|k-1}^2 = \frac{3\lambda^2}{\pi^2 \gamma^2 \text{SNR}_{i,k|k-1}} ;$$

其中, $c = 3 \times 10^8$ m/s, β 为雷达发射信号有效带宽, λ 为雷达工作波长, γ 为天线孔径, $\text{SNR}_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达 $k-1$ 时刻预测 k 时刻的目标回波信噪比, 其数学表达式

为:

$$\text{SNR}_{i,k|k-1} = \frac{T_{d,i,k}}{T_r} \cdot \frac{P_{i,k} G_t G_r \sigma_i \lambda^2 G_{\text{RP}}}{(4\pi)^3 k_0 T_0 B_r F_r (R_{i,k|k-1})^4} \cdot \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\tilde{\alpha}_i)^2}{\theta_{3\text{dB}}^2} \right] ;$$

其中, $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率, T_r 为各雷达脉冲重复周期, G_t 和 G_r 分别为各雷达发射天线增益和接收天线增益, σ_i 为目标相对第 i 部雷达的雷达散射截面, G_{RP} 为雷达接收机处理增益, k_0 和 T_0 分别为玻尔兹曼常数和各雷达接收机噪声温度, B_r 为各雷达接收机匹配滤波器带宽, F_r 为各雷达接收机噪声系数, $R_{i,k|k-1}$ 为第 i 部雷达 $k-1$ 时刻预测 k 时刻与目标之间的距离, $\tilde{\alpha}_i$ 为目标的真实方位角与第 i 部雷达发射波束之间的角度差, $\theta_{3\text{dB}}$ 为各雷达天线 3dB 波束宽度;

对目标的贝叶斯信息矩阵计算表达式求逆, 即得到目标运动状态估计误差的预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵, 其数学表达式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{k|k-1} &= \left[\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}) \right]^{-1} \\ &= \left\{ \left[\mathbf{Q} + \mathbf{FJ}^{-1}(\mathbf{X}_{k|k-1})\mathbf{F}^T \right]^{-1} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[\left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right)^T \left(\boldsymbol{\Psi}_{i,k|k-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{G}_{i,k|k-1} \right) \right]_{\mathbf{X}_{k|k-1}} \right\}^{-1} ; \end{aligned}$$

在此, 采用预测贝叶斯克拉美-罗下界矩阵 $\mathbf{C}_{k|k-1}$ 的迹来表征目标跟踪精度 $Q_{k|k-1}$, 即:

$$Q_{k|k-1} = \text{Tr}(\mathbf{C}_{k|k-1}) ;$$

其中, $\text{Tr}(\bullet)$ 表示求矩阵的迹运算。

4、根据权利要求 1 所述的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法, 其特征在于, 步骤 S3 中优化目标函数 F_k 的数学表达式为:

$$F_k = \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k} - T_{d,\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \xi \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k} - P_{\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (P_{\max} - P_{\min})} ;$$

其中, α 和 ξ 分别为驻留时间和辐射功率的权重系数, $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率, $T_{d,\min}$ 和 $T_{d,\max}$ 分别为各雷达驻留时间的下限和

上限, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为各雷达辐射功率的下限和上限, N_{rad} 表示单基地相控阵雷达的数量。

5、根据权利要求 1 所述的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法, 其特征在于, 步骤 S4 中以目标跟踪精度满足预先设定的目标跟踪误差阈值及组网雷达系统辐射资源为约束条件, 以最小化各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标, 建立面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型, 如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \min_{T_{d,i,k}, P_{i,k}} F_k &= \alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k} - T_{d,\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \xi \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k} - P_{\min})}{N_{\text{rad}} \cdot (P_{\max} - P_{\min})}, \\ \text{s.t.: } Q_{k|k-1} &\leq Q_{\max}, \\ T_{d,\min} &\leq T_{d,i,k} \leq T_{d,\max}, \\ P_{\min} &\leq P_{i,k} \leq P_{\max}. \end{aligned} \right\} ;$$

其中, F_k 为各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标, α 和 ξ 分别为驻留时间和辐射功率的权重系数, N_{rad} 表示单基地相控阵雷达的数量, $T_{d,i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为 k 时刻第 i 部雷达照射目标的驻留时间和辐射功率, $T_{d,\min}$ 和 $T_{d,\max}$ 分别为各雷达驻留时间的下限和上限, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为各雷达辐射功率的下限和上限, $Q_{k|k-1}$ 为目标跟踪精度, $Q_{\max}$ 为预先设定的目标跟踪误差阈值。

6、根据权利要求 1 所述的面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化方法, 其特征在于, 步骤 S5 中采用 MATLAB 软件中的 fmincon 函数对面向低截获的组网雷达驻留时间与辐射功率联合优化模型进行计算求解, 所得即为 k 时刻第 i 部雷达的最优驻留时间 $T_{d,i,k}^*$ 与辐射功率 $P_{i,k}^*$, 其中, $(\bullet)^*$ 表示参数的最优值。

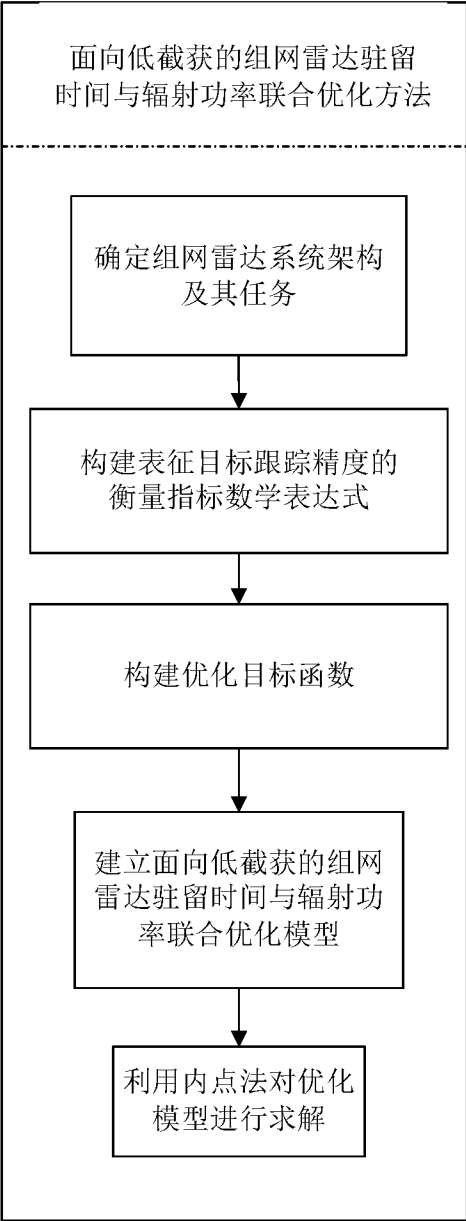


图 1

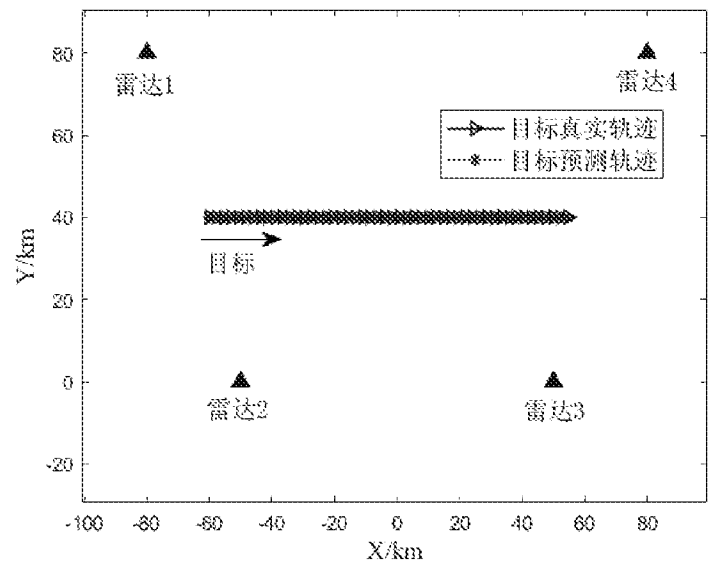


图 2

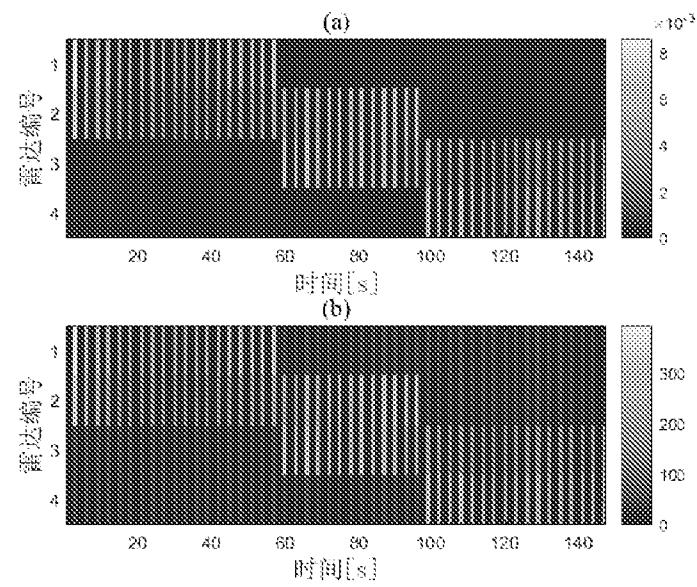


图 3

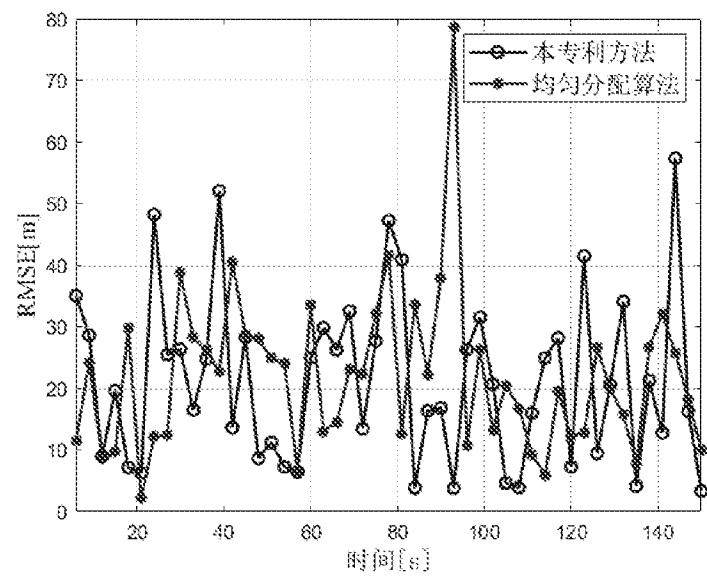


图 4

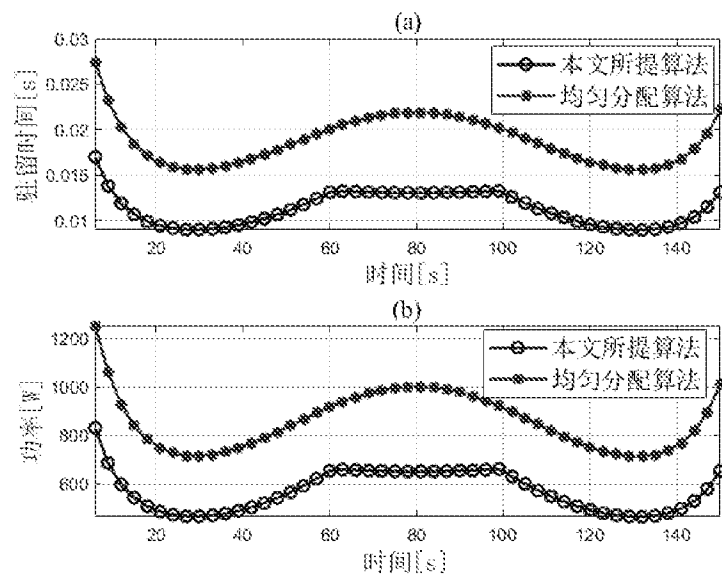


图 5

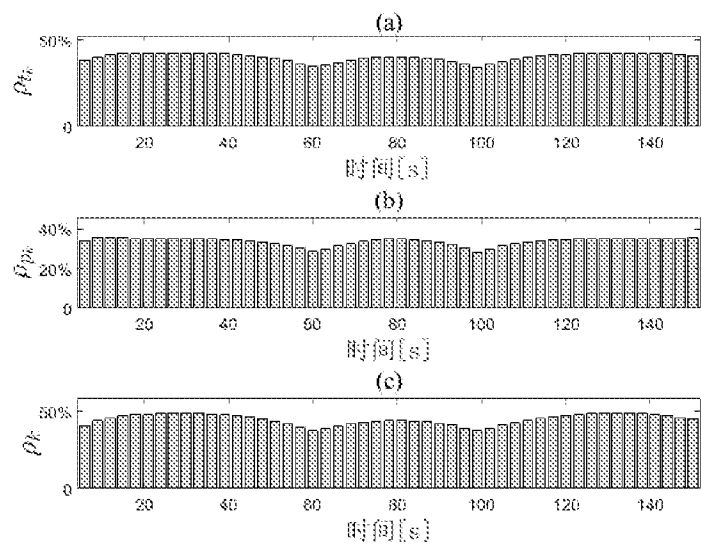


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/111323

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 13/87(2006.01)i; G01S 13/72(2006.01)i; G01S 7/282(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 13/-; G01S 7/-

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, WPI, EPODOC, CNKI, 南京航空航天大学, 时晨光, 雷达, 组网, 多, 功率, 时间, 优化, 分配, 资源, 管理, 贝叶斯, 克拉美, distribution, radar, network, incorporate, transmission, power, optimize, resource, management, time, CRLB

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 111323773 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 23 June 2020 (2020-06-23) description, paragraphs [0087]-[0132], [0140], [0155]	1-3, 6
Y	CN 106291481 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 04 January 2017 (2017-01-04) abstract	1-3, 6
Y	CN 111025275 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 17 April 2020 (2020-04-17) description, paragraphs [0079], [0100], [0117]	1-3, 6
A	CN 111090078 A (NO.8511 RESEARCH INSTITUTE OF CASIC) 01 May 2020 (2020-05-01) entire document	1-6
A	CN 107728139 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 23 February 2018 (2018-02-23) entire document	1-6
A	WO 2020023086 A1 (RAYTHEON COMPANY) 30 January 2020 (2020-01-30) entire document	1-6



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

27 April 2021

Date of mailing of the international search report

20 May 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
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/111323

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111323773	A	23 June 2020	None			
CN	106291481	A	04 January 2017	CN	106291481	B	19 July 2019
CN	111025275	A	17 April 2020	None			
CN	111090078	A	01 May 2020	None			
CN	107728139	A	23 February 2018	CN	107728139	B	17 November 2020
WO	2020023086	A1	30 January 2020	US	2020036487	A1	30 January 2020
				CA	3101010	A1	30 January 2020

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/111323

A. 主题的分类

G01S 13/87(2006.01)i; G01S 13/72(2006.01)i; G01S 7/282(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 13/-; G01S 7/-

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, WPI, EPDOC, CNKI, 南京航空航天大学, 时晨光, 雷达, 组网, 多, 功率, 时间, 优化, 分配, 资源, 管理, 贝叶斯, 克拉美, distribution, radar, network, incorporate, transmission, power, optimize, resource, management, time, CRLB

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
Y	CN 111323773 A (南京航空航天大学) 2020年 6月 23日 (2020 - 06 - 23) 说明书第[0087]-[0132], [0140], [0155]段	1-3, 6
Y	CN 106291481 A (南京航空航天大学) 2017年 1月 4日 (2017 - 01 - 04) 摘要	1-3, 6
Y	CN 111025275 A (南京航空航天大学) 2020年 4月 17日 (2020 - 04 - 17) 说明书第[0079], [0100], [0117]段	1-3, 6
A	CN 111090078 A (中国航天科工集团八五——研究所) 2020年 5月 1日 (2020 - 05 - 01) 全文	1-6
A	CN 107728139 A (电子科技大学) 2018年 2月 23日 (2018 - 02 - 23) 全文	1-6
A	WO 2020023086 A1 (RAYTHEON COMPANY) 2020年 1月 30日 (2020 - 01 - 30) 全文	1-6

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 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

2021年 4月 27日

国际检索报告邮寄日期

2021年 5月 20日

ISA/CN的名称和邮寄地址

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

受权官员

陈溥

电话号码 86-(10)-53962422

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/111323

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	111323773	A	2020年 6月 23日	无	
CN	106291481	A	2017年 1月 4日	CN 106291481	B 2019年 7月 19日
CN	111025275	A	2020年 4月 17日	无	
CN	111090078	A	2020年 5月 1日	无	
CN	107728139	A	2018年 2月 23日	CN 107728139	B 2020年 11月 17日
WO	2020023086	A1	2020年 1月 30日	US 2020036487	A1 2020年 1月 30日
				CA 3101010	A1 2020年 1月 30日