



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106291481 B

(45)授权公告日 2019.07.19

(21)申请号 201610601311.2

(22)申请日 2016.07.27

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106291481 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(73)专利权人 南京航空航天大学  
地址 211106 江苏省南京市江宁区将军大  
道29号

(72)发明人 汪飞 刘东颖

(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限  
公司 32200

代理人 许方

(51)Int.Cl.

G01S 7/36(2006.01)

G01S 7/42(2006.01)

G01S 7/282(2006.01)

G01S 13/00(2006.01)

(56)对比文件

US 7956807 B1,2011.06.07,全文.

CN 103678906 A,2014.03.26,全文.

CN 105044684 A,2015.11.11,全文.

CN 105716891 A,2016.06.29,全文.

CN 105158756 A,2015.12.16,全文.

廖雯雯等.MIMO雷达射频隐身性能优化的目  
标跟踪算法.《航空学报》.2014,第35卷(第4期),  
第1134-1141页.

Fei Wang et.al.Security information  
factor based airborne radar RF stealth.  
《Journal of Systems Engineering and  
Electronics》.2015,第26卷(第2期),第258-266  
页.

时晨光等.基于低截获概率优化的雷达组网  
系统最优功率分配算法.《雷达学报》.2014,第3  
卷(第4期),第465-473页.

审查员 鹿倩

权利要求书2页 说明书8页 附图6页

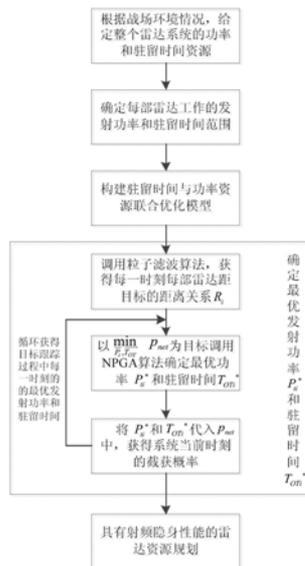
(54)发明名称

基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合  
优化方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于射频隐身的分布式  
MIMO雷达资源联合优化方法,属于分布式MIMO雷  
达技术领域。本方法首先根据战场环境和雷达自  
身性能,确定每部雷达发射功率和驻留时间的  
上、下界;然后以最小化系统的截获概率为目标,  
在满足目标跟踪性能的条件下,构建基于射频隐  
身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合  
优化模型,并通过非线性规划的遗传算法对模型  
进行求解;经数值计算,得到每部雷达的驻留时  
间和发射功率的最优解,进而可得到符合约束条  
件的分布式MIMO雷达系统的最小截获概率。本发  
明降低了分布式MIMO雷达系统的截获概率,提升  
了系统的射频隐身性能。

CN 106291481 B



1. 一种基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,确定分布式MIMO雷达系统总的发射功率  $P_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} P_{ti}$  和驻留时间  $T_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} T_{OTi}$  资源,根据系统的总资源,确定每部雷达发射功率和驻留时间资源的上、下界  $\{P_{ti}^{\min}, P_{ti}^{\max}, T_{OTi}^{\min}, T_{OTi}^{\max}\}$ ,作为优化模型的资源优化区间,其中: $N_t$ 代表雷达系统的发射机个数, $P_{ti}$ 为第*i*部雷达的发射功率, $T_{OTi}$ 为第*i*部雷达的驻留时间;

步骤2,根据分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的要求,确定衡量指标Bhattacharyya距离的门限 $B^{th}$ ;

步骤3,根据给定的目标反射系数的方差 $R_g$ 、传播损耗因子 $p_{ij}$ 、雷达接收机的噪声方差 $R_0$ 以及发射信号脉冲重复频率 $f_r$ 参量,计算每一时刻分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的衡量指标Bhattacharyya距离 $B_{net}$ ,并将 $B_{net} \geq B^{th}$ 作为优化模型的非线性约束条件;

步骤4,根据给定的虚警概率 $P_{fa}$ 、截获接收机总搜索时间 $T_I$ 以及雷达和截获接收机的性能参量,计算分布式MIMO雷达系统截获概率 $p_{net}$ ,并将  $\min_{P_i, T_{OT}} P_{net}$  作为优化模型的目标函数;

步骤5,根据步骤1确定的第*i*部雷达的发射功率和驻留时间区间、步骤3确定的非线性约束条件以及步骤4确定的目标函数,构建基于射频隐身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化模型;

步骤6,对步骤5建立的优化模型采用非线性规划的遗传算法进行求解,得到当前时刻使得分布式MIMO雷达系统截获概率 $p_{net}$ 最小的最优发射功率 $P_{ti}^*$ 和驻留时间 $T_{OTi}^*$ 解,并循环求解出目标跟踪过程中满足检测性能要求的所有时刻的发射功率和驻留时间的解集。

2. 根据权利要求1所述的基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,其特征在于:所述步骤3中分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的衡量指标Bhattacharyya距离的数学表达式为:

$$B_{net} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \log \left[ \frac{1 + P_{ti} T_{OTi} f_r R_g p_{ij}^2 (2R_0)^{-1}}{\sqrt{1 + P_{ti} T_{OTi} f_r R_g p_{ij}^2 (R_0)^{-1}}} \right];$$

其中, $P_{ti}$ 为第*i*部雷达的发射功率, $T_{OTi}$ 为第*i*部雷达的驻留时间, $R_g$ 为目标反射系数的方差, $p_{ij}$ 为传播损耗因子, $R_0$ 为雷达接收机的噪声方差, $f_r$ 为雷达发射信号的脉冲重复频率, $N_t$ 和 $N_r$ 分别为雷达系统的发射机个数和接收机个数。

3. 根据权利要求1所述的基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,其特征在于:所述步骤5中构建的基于射频隐身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化模型为:

$$\left. \begin{aligned}
 & \min_{P_i, T_{OT}} P_{net}, \\
 & s.t.: B_{net} \geq B^{th}, \\
 & P_{tot}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{N_t} P_{ti} \leq P_{tot}^{\max}, \quad P_{ti}^{\min} \leq P_{ti} \leq P_{ti}^{\max} \quad \forall i \\
 & T_{tot}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{N_t} T_{OTi} \leq T_{tot}^{\max}, \quad T_{OTi}^{\min} \leq T_{OTi} \leq T_{OTi}^{\max} \quad \forall i
 \end{aligned} \right\}$$

其中： $P_{tot}^{\min}$ 为分布式MIMO雷达系统的最低发射功率； $P_{tot}^{\max}$ 为分布式MIMO雷达系统的最高发射功率； $T_{tot}^{\min}$ 为分布式MIMO雷达系统的最小驻留时间； $T_{tot}^{\max}$ 为分布式MIMO雷达系统的最大驻留时间， $P_{ti}^{\min}$ 为第i部雷达的最低发射功率； $P_{ti}^{\max}$ 为第i部雷达的最高发射功率； $T_{OTi}^{\min}$ 为第i部雷达的最小驻留时间； $T_{OTi}^{\max}$ 为第i部雷达的最大驻留时间。

4. 根据权利要求1所述的基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法，其特征在于：所述步骤6中当前时刻使得分布式MIMO雷达系统截获概率 $p_{net}$ 最小的最优发射功率 $P_{ti}^*$ 和驻留时间 $T_{OTi}^*$ 解，是以 $\min_{P_i, T_{OT}} P_{net}$ 为优化目标， $B_{net} \geq B^{th}$ 为非线性约束条件，采用非线性规划的遗传算法进行计算，求得使目标函数 $p_{net}$ 最小的一组解 $P_{ti}^*$ 、 $T_{OTi}^*$ ，即为当前时刻发射功率 $P_{ti}$ 和驻留时间 $T_{OTi}$ 的一组最优解。

## 基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,属于分布式MIMO雷达技术领域。

### 背景技术

[0002] 随着现代战场中电子对抗的日益激烈,雷达的生存环境受到了严重的威胁。射频隐身技术能显著降低雷达被探测、发现、识别和攻击的概率,是提高雷达及其运载平台的战场生存能力和作战效能的重要保证。相比雷达隐身和红外隐身,射频隐身技术有所不同,并非无限制的降低目标特征,而是在满足设备功能、性能要求的基础上对目标特征进行有效控制,提高其低被截获性能。

[0003] 基于射频隐身理论,目前可采用的低被截获优化策略主要有两大类:最小辐射能量策略和最大信号不确定性策略。最小辐射能量策略要求在任何时间都应以系统所需的最小能量向外辐射,该策略通过主动辐射源的辐射功率管理、辐射时间优化和低旁瓣天线设计,降低系统的辐射能量和旁瓣功率。目前关于单个机载雷达的辐射能量控制策略已相对较成熟。

[0004] 随着计算机技术、通信技术和微波集成电路的快速发展,以及现代战争复杂性的日益提高,越来越多的传感器被纳入一体化网络参与协同作战。同时,面对日益复杂的战场电磁环境,综合利用多传感器的信息在空间域进行多传感器信息融合不仅可以提高系统的可靠性和生存能力,而且可以尽可能全面、准确地获取信息。多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达系统是未来网络化斗争发展的必然趋势。MIMO雷达是利用多个发射天线同步地发射分集的波形,同时使用多个接收天线接收回波信号,并集中处理的一种新型雷达体制。在克服信道衰落、提高分辨率和抑制干扰等方面具有巨大的潜力。分布式的MIMO雷达其阵元间距较大,接收阵元收到的回波信号可以被近似看做是相互独立的,它可以利用目标雷达截面积(RCS)的空间分集增益来提高检测性能。

[0005] 分布式MIMO雷达作为研究的新领域,许多文献主要着眼于雷达的探测性能,而将射频隐身性能作为优化目标的研究相对较少。为提高分布式MIMO雷达的射频隐身性能,有文献通过最小辐射能量控制策略,优化每一时刻的雷达发射功率,达到降低雷达截获因子的目的。但是分布式MIMO雷达作为雷达网络系统,可控参数很多,单一优化一个参量,对雷达隐身性能的改变并不明显,也会造成其他资源的不必要浪费。

### 发明内容

[0006] 本发明提出了一种基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,在满足分布式MIMO雷达跟踪性能要求的前提下,通过动态地优化各部雷达的发射功率和驻留时间,达到最小化雷达组网系统的截获概率的目的,以提升系统的射频隐身性能。

[0007] 本发明为解决其技术问题采用如下技术方案:

[0008] 一种基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤1, 确定分布式MIMO雷达系统总的发射功率  $P_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} P_{ti}$  和驻留时间

$T_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} T_{OTi}$  资源, 根据系统的总资源, 确定每部雷达发射功率和驻留时间资源的上、下

界  $\{P_{ti}^{\min}, P_{ti}^{\max}, T_{OTi}^{\min}, T_{OTi}^{\max}\}$ , 作为优化模型的资源优化区间;

[0010] 步骤2, 根据分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的要求, 确定衡量指标 Bhattacharyya 距离的门限  $B^{\text{th}}$ ;

[0011] 步骤3, 根据给定的目标反射系数的方差  $R_g$ 、传播损耗因子  $p_{ij}$ 、雷达接收机的噪声方差  $R_\theta$  以及发射信号脉冲重复频率  $f_r$  参量, 计算每一时刻分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的衡量指标 B 距离  $B_{\text{net}}$ , 并将  $B_{\text{net}} \geq B^{\text{th}}$  作为优化模型的非线性约束条件;

[0012] 步骤4, 根据给定的虚警概率  $P_{fa}$ 、截获接收机总搜索时间  $T_I$  以及雷达和截获接收机的性能参量, 计算分布式MIMO雷达系统截获概率  $p_{\text{net}}$ , 并将  $\min_{P_i, T_{OT}} P_{\text{net}}$  作为优化模型的目标函数;

[0013] 步骤5, 根据步骤1确定的第  $i$  部雷达的发射功率和驻留时间区间、步骤3确定的非线性约束条件以及步骤4确定的目标函数, 构建基于射频隐身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化模型;

[0014] 步骤6, 对步骤5建立的优化模型采用非线性规划的遗传算法进行求解, 得到当前时刻使得分布式MIMO雷达系统截获概率  $p_{\text{net}}$  最小的最优发射功率  $P_{ti}^*$  和驻留时间  $T_{OTi}^*$  解, 并循环求解出目标跟踪过程中满足检测性能要求的所有时刻的发射功率和驻留时间的解集。

[0015] 所述步骤3中分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的衡量指标 B 距离的数学表达式为:

$$[0016] \quad B_{\text{net}} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \log \left[ \frac{1 + P_{ti} T_{OTi} f_r R_g p_{ij}^2 (2R_\theta)^{-1}}{\sqrt{1 + P_{ti} T_{OTi} f_r R_g p_{ij}^2 (R_\theta)^{-1}}} \right];$$

[0017] 其中,  $R_g$  为目标反射系数的方差,  $p_{ij}$  为传播损耗因子,  $R_\theta$  为雷达接收机的噪声方差,  $f_r$  为雷达发射信号的脉冲重复频率,  $N_t$  和  $N_r$  分别为雷达系统的发射机和接收机个数。

[0018] 所述步骤4中分布式MIMO雷达系统截获概率的数学表达式为:

$$[0019] \quad p_{\text{net}} = 1 - \prod_{i=1}^{N_t} (1 - p_i) \\ = 1 - \prod_{i=1}^{N_t} \left( 1 - 0.5 \times \text{erfc} \left( \sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{K_{rl} \frac{P_{ti}}{R_i^2} + 0.5} \right) \frac{T_{OTi}}{T_I} \right);$$

[0020] 其中,  $P_{fa}$  是虚警概率、 $T_I$  是截获接收机总搜索时间,  $R_i$  是雷达发射机到截获接收机的距离,  $p_i = 0.5 \times \text{erfc} \left( \sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{K_{rl} \frac{P_{ti}}{R_i^2} + 0.5} \right) \frac{T_{OTi}}{T_I}$  是跟踪状态下第  $i$  部雷达信号被截

获的概率,  $\text{erfc}$  为互补误差函数, 其数学表达式为  $\text{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv$ ;

$K_{rl} = \frac{G_t G_r \lambda^2 G_{IP}}{(4\pi)^2 k T_o B_l F_l L_l}$  主要由雷达和截获接收机的性能决定, 为自定义参数; 其中  $G_t$  是雷达

发射天线在截获接收机方向上的增益, 考虑截获接收机由目标搭载, 所以雷达在进行目标跟踪时, 截获接收机检测到的是雷达主瓣;  $G_r$  是截获接收机天线的增益;  $B_l$  是截获接收机的带宽;  $F_l$  是截获接收机的噪声系数;  $L_l$  是雷达发射天线到截获接收机的系统损耗系数;  $G_{IP}$  为截获接收机处理器净增益,  $k$  是玻尔兹曼常数, 值为  $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

[0021] 所述步骤5中构建的基于射频隐身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化模型为:

$$\begin{aligned}
 & \min_{P_t, T_{OT}} P_{net}, \\
 & s.t.: B_{net} \geq B^{th}, \\
 & P_{tot}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{N_l} P_{ti} \leq P_{tot}^{\max}, \quad P_{ti}^{\min} \leq P_{ti} \leq P_{ti}^{\max} (\forall i) \\
 & T_{tot}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{N_l} T_{OTi} \leq T_{tot}^{\max}, \quad T_{OTi}^{\min} \leq T_{OTi} \leq T_{OTi}^{\max} (\forall i)
 \end{aligned}$$

[0023] 其中:  $P_{tot}^{\min}$  为分布式MIMO雷达系统的最低发射功率;  $P_{tot}^{\max}$  为分布式MIMO雷达系统的最高发射功率;  $T_{tot}^{\min}$  为分布式MIMO雷达系统的最小驻留时间;  $T_{tot}^{\max}$  为分布式MIMO雷达系统的最大驻留时间,  $P_{ti}^{\min}$  为第  $i$  部雷达的最低发射功率;  $P_{ti}^{\max}$  为第  $i$  部雷达的最高发射功率;  $T_{OTi}^{\min}$  为第  $i$  部雷达的最小驻留时间;  $T_{OTi}^{\max}$  为第  $i$  部雷达的最大驻留时间。

[0024] 所述步骤6中当前时刻使得分布式MIMO雷达系统截获概率  $p_{net}$  最小的最优发射功率  $P_{ti}^*$  和驻留时间  $T_{OTi}^*$  解, 是以  $\min_{P_t, T_{OT}} P_{net}$  为优化目标,  $B_{net} \geq B^{th}$  为非线性约束条件, 采用非线性规划的遗传算法进行计算, 求得使目标函数  $p_{net}$  最小的一组解  $P_{ti}^*$ 、 $T_{OTi}^*$ , 即为当前时刻发射功率  $P_{ti}$  和驻留时间  $T_{OTi}$  的一组最优解。

[0025] 本发明的有益效果如下:

[0026] 1. 本发明将实际战场中雷达的发射功率和驻留时间建模为上、下界已知的不确定集合, 以最小化系统的截获概率为目标, 在满足一定目标跟踪性能的条件下建立基于射频隐身性能优化的驻留时间与功率资源联合优化模型, 既保证系统的目标跟踪过程中的检测性能, 还使系统在发射功率和驻留时间不确定的情况下确保其具有射频隐身性能。

[0027] 2. 本发明提出的基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法, 不单考虑了系统在目标跟踪过程中的射频隐身问题, 同时也是实现了雷达系统资源有效利用。

### 附图说明

- [0028] 图1为分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化方法流程图。
- [0029] 图2为目标跟踪轨迹图。
- [0030] 图3为分布式MIMO雷达系统与目标之间的距离关系图。
- [0031] 图4为跟踪过程中分布式MIMO雷达系统的最优功率分配结果图；
- [0032] 其中,图4 (a) 为跟踪过程中雷达1的发射功率；
- [0033] 图4 (b) 为跟踪过程中雷达2的发射功率；
- [0034] 图4 (c) 为跟踪过程中雷达3的发射功率；
- [0035] 图4 (d) 为跟踪过程中雷达4的发射功率。
- [0036] 图5为跟踪过程中分布式MIMO雷达系统的最优驻留时间分配结果图；
- [0037] 其中图 (a) 为跟踪过程中雷达1的驻留时间；
- [0038] 图 (b) 为跟踪过程中雷达2的驻留时间；
- [0039] 图 (c) 为跟踪过程中雷达3的驻留时间；
- [0040] 图 (d) 为跟踪过程中雷达4的驻留时间。
- [0041] 图6为跟踪过程中的截获概率对比图。

### 具体实施方式

[0042] 附图非限制性地公开了本发明一个优选实施例的结构示意图,以下将结合附图详细地说明本发明的技术方案。

[0043] 实施例

[0044] 本实施例的一种基于射频隐身的分布式MIMO雷达资源联合优化方法,如图1的流程图所示,首先根据战场环境和雷达自身性能,给定分布式MIMO雷达系统总的发射功率和驻留时间资源,并分配给每部雷达,确定每部雷达发射功率和驻留时间的上、下界;然后以最小化分布式MIMO雷达系统的截获概率为目标,在满足目标跟踪过程中检测性能的条件下,构建基于射频隐身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化模型,并通过非线性规划的遗传算法对模型进行求解;经数值计算,得到在满足目标跟踪过程中检测性能条件下使得分布式MIMO雷达系统截获概率 $p_{net}$ 最小的各雷达的驻留时间 $T_{OTi}^*$ ,和发射功率 $P_{ti}^*$ 作为最优解,进而可得到当前时刻符合约束条件的系统最小截获概率。

[0045] 如图1所示,具体包括以下步骤:

[0046] 1、确定发射功率和驻留时间的优化区间雷达的发射功率和驻留时间的上、下界不仅和雷达系统的性能参数有关,还和当前战场环境中目标距雷达的距离有关。首先,根据分

布式MIMO雷达系统的性能参数,确定系统总的发射功率  $P_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} P_{ti}$  和驻留时间

$T_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} T_{OTi}$  资源,其中 $P_{ti}$ 为每部雷达工作时的发射功率; $N_t$ 为分布式MIMO雷达系统的

雷达发射机个数; $T_{OTi}$ 为每部雷达工作时的驻留时间,再根据预测的目标距雷达的距离,确

定每部雷达发射功率和驻留时间资源的上、下界  $\{P_{ti}^{\min}, P_{ti}^{\max}, T_{OTi}^{\min}, T_{OTi}^{\max}\}$ , 作为优化模型的资源优化区间;

[0047] 2、建立非线性约束条件

[0048] 根据给定的目标反射系数的方差  $R_g$ 、传播损耗因子  $p_{ij}$ 、雷达接收机的噪声方差  $R_\theta$  以及发射信号脉冲重复频率  $f_r$  参量, 计算每一时刻分布式MIMO雷达系统目标跟踪过程中检测性能的衡量指标Bhattacharyya距离 (巴氏距离):

$$[0049] \quad B_{net} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \log \left[ \frac{1 + P_{ti} T_{OTi} f_r R_g p_{ij}^2 (2R_\theta)^{-1}}{\sqrt{1 + P_{ti} T_{OTi} f_r R_g p_{ij}^2 (R_\theta)^{-1}}} \right] \quad (1)$$

[0050] 其中,  $N_t$ 和 $N_r$ 分别为雷达系统的发射机和接收机个数。

[0051] 根据系统目标跟踪过程中检测性能的要求, 确定衡量指标的门槛  $B^{th}$ , 并将  $B_{net} \geq B^{th}$  作为优化模型的非线性约束条件。

[0052] 3、建立优化模型的目标函数

[0053] 根据给定的虚警概率  $P_{fa}$ 、截获接收机总搜索时间  $T_I$  以及雷达和截获接收机的性能参量, 计算分布式MIMO雷达系统截获概率  $p_{net}$ , 并将  $\min_{P_t, T_{OT}} P_{net}$  作为优化模型的目标函数:

$$[0054] \quad \begin{aligned} p_{net} &= 1 - \prod_{i=1}^{N_t} (1 - p_i) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^{N_t} \left( 1 - 0.5 \times \operatorname{erfc} \left( \sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{K_{rl} \frac{P_{ti}}{R_i^2} + 0.5} \right) \frac{T_{OTi}}{T_I} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

[0055] 其中,  $P_{fa}$ 是虚警概率、 $T_I$ 是截获接收机总搜索时间,  $R_i$ 是雷达发射机到截获接收机的距离。  $p_i = 0.5 \times \operatorname{erfc} \left( \sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{K_{rl} \frac{P_{ti}}{R_i^2} + 0.5} \right) \frac{T_{OTi}}{T_I}$  是跟踪状态下第  $i$  部雷达信号

被截获的概率;  $\operatorname{erfc}$  为互补误差函数, 其数学表达式为  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv$ 。

[0056] 其中,  $K_{rl} = \frac{G_t G_r \lambda^2 G_{IP}}{(4\pi)^2 k T_o B_I F_I L_I}$  主要由雷达和截获接收机的性能决定, 为自定义参

数,  $G_t$ 是雷达发射天线在截获接收机方向上的增益, 考虑截获接收机由目标搭载, 所以雷达在进行目标跟踪时, 截获接收机检测到的是雷达主瓣;  $G_r$ 是截获接收机天线的增益;  $B_I$ 是截获接收机的带宽;  $F_I$ 是截获接收机的噪声系数;  $L_I$ 是雷达发射天线到截获接收机的系统损耗系数;  $G_{IP}$ 为截获接收机处理器净增益,  $k$ 是玻尔兹曼常数, 值为  $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

[0057] 4、建立驻留时间与功率资源联合优化模型

[0058] 根据步骤1确定的第  $i$  部雷达的发射功率和驻留时间区间、步骤2确定的非线性约

束条件以及步骤3确定的目标函数,构建基于射频隐身的分布式MIMO雷达驻留时间与功率资源联合优化模型:

$$\left. \begin{aligned}
 & \min_{\bar{P}_t, \bar{T}_{OT}} p_{net}, \\
 & s.t.: B_{net} \geq B^{th}, \\
 & P_{tot}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{N_t} P_{ti} \leq P_{tot}^{\max}, \quad P_{ti}^{\min} \leq P_{ti} \leq P_{ti}^{\max} (\forall i) \\
 & T_{tot}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{N_t} T_{OTi} \leq T_{tot}^{\max}, \quad T_{OTi}^{\min} \leq T_{OTi} \leq T_{OTi}^{\max} (\forall i)
 \end{aligned} \right\} (3)$$

[0060] 其中:  $P_{tot}^{\min}$  为分布式MIMO雷达系统的最低发射功率;  $P_{tot}^{\max}$  为分布式MIMO雷达系统的最高发射功率;  $T_{tot}^{\min}$  为分布式MIMO雷达系统的最小驻留时间;  $T_{tot}^{\max}$  为分布式MIMO雷达系统的最大驻留时间,  $P_{ti}^{\min}$  为第i部雷达的最低发射功率;  $P_{ti}^{\max}$  为第i部雷达的最高发射功率;  $T_{OTi}^{\min}$  为第i部雷达的最小驻留时间;  $T_{OTi}^{\max}$  为第i部雷达的最大驻留时间。

[0061] 5、获得发射功率和驻留时间的最优解

[0062] 以  $\min_{\bar{P}_t, \bar{T}_{OT}} p_{net}$  为优化目标,  $B_{net} \geq B^{th}$  为非线性约束条件, 采用非线性规划的遗传算法对步骤4建立的优化模型进行求解, 得到当前时刻使得分布式MIMO雷达系统截获概率  $p_{net}$  最小的最优发射功率  $P_{ti}^*$  和驻留时间  $T_{OTi}^*$  解, 并循环求解出目标跟踪过程中满足检测性能要求的所有时刻的发射功率和驻留时间的解集。

[0063] 6、仿真结果

[0064] 本发明针对一个二维平面中运动的目标场景进行了仿真。仿真中, 假设  $N_t = N_r = 4$ 。初始时刻雷达位置分布如表1所示。

[0065] 表1初始时刻雷达位置

[0066]

雷达	位置
雷达1	[0, 0] km
雷达2	[40, 0] km
雷达3	[0, 40] km
雷达4	[40, 40] km

[0067] 分布式MIMO雷达系统的总发射功率为  $P_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_t} P_{ti} = 12 \text{ kW}$ , 每部雷达最大发射功率为  $P_{ti}^{\max} = 3 \text{ kW} (\forall i)$ , 最小发射功率为  $P_{ti}^{\min} = 100 \text{ W} (\forall i)$ , 总驻留时间为

$T_{tot}^{\max} = \sum_{i=1}^{N_i} T_{OTi} = 200\text{ms}$ , 每部雷达最大驻留时间为  $T_{OTi}^{\max} = 50\text{ms} (\forall i)$ , 最小驻留时间为

$T_{OTi}^{\min} = 1\text{ms} (\forall i)$ 。其余仿真参数数值如表2示。

[0068] 表2仿真参数表

[0069]

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$G_r$	15dB	$B_I$	200MHz
$P_{fa}$	$10^{-8}$	$L_I$	6dB
$\lambda$	0.03m	$G_{IP}$	2dB
$T_I$	5s	$T_R$	$5 \times 10^{-4}\text{s}$
$R_g$	1	$G_t$	25dB
$F_I$	6dB	——	——

[0070] 目标跟踪轨迹如图2所示,图2中还显示了四部雷达之间的相对位置,跟踪过程中雷达系统与目标之间的距离关系如图3所示。采用非线性规划的遗传算法对本发明所提优化模型进行求解,计算出各个时刻每部雷达的发射功率和驻留时间分配情况,并得到优化后的截获概率。跟踪过程中分布式MIMO雷达系统的最优发射功率和驻留时间分配结果如图4所示。

[0071] 优化各部雷达的发射功率和驻留时间后所计算出的截获概率如图5所示,同时图5也显示了未优化的分布式MIMO雷达系统的截获概率和只优化发射功率情况下的截获概率。从图5中可以看出,进行优化后的分布式MIMO雷达系统的截获概率明显低于未优化的分布式MIMO雷达系统,而同时优化了发射功率和驻留时间两个参数的分布式MIMO雷达系统的截获概率又低于只优化发射功率单一参数的分布式MIMO雷达系统。

[0072] 由上述仿真结果可知,本发明在保证目标跟踪性能的前提下,通过动态地调整各部雷达的发射功率和驻留时间,能有效地降低系统被截获的概率,提高系统的射频隐身性能。并且,在整个目标跟踪过程中,各部雷达并非时刻采用最大发射功率和驻留时间进行工作,而是通过合理的分配雷达的资源,实现了雷达资源的有效利用。

[0073] 如图4所示,显示了根据本文所提算法优化后的系统最优功率分配结果;其中,图4(a)为跟踪过程中雷达1的发射功率;图4(b)为跟踪过程中雷达2的发射功率;图4(c)为跟踪过程中雷达3的发射功率;图4(d)为跟踪过程中雷达4的发射功率。

[0074] 如图5所示,显示了根据本文所提算法优化后的系统最优驻留时间分配结果;其中图(a)为跟踪过程中雷达1的驻留时间;图(b)为跟踪过程中雷达2的驻留时间;图(c)为跟踪过程中雷达3的驻留时间;图(d)为跟踪过程中雷达4的驻留时间。

[0075] 结合图4和图5可以看出,雷达的发射功率和驻留时间随着雷达和目标之间距离的变化而变化。在距离相对较近时,先优化的是驻留时间,发射功率保持最小值;当距离增大到一定值时,驻留时间达到最大值,此时开始增大雷达的发射功率。

[0076] 如图6所示,对比了三种不同工作方式下的系统截获概率。从图中可以看出,采用本文所提算法优化后的系统截获概率明显低于其他两种工作方式下的系统截获概率。

[0077] 上面结合附图所描述的本发明优选具体实施例仅用于说明本发明的实施方式,而

不是作为对前述发明目的和所附权利要求内容和范围的限制,凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所做的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属本发明技术和权利保护范畴。

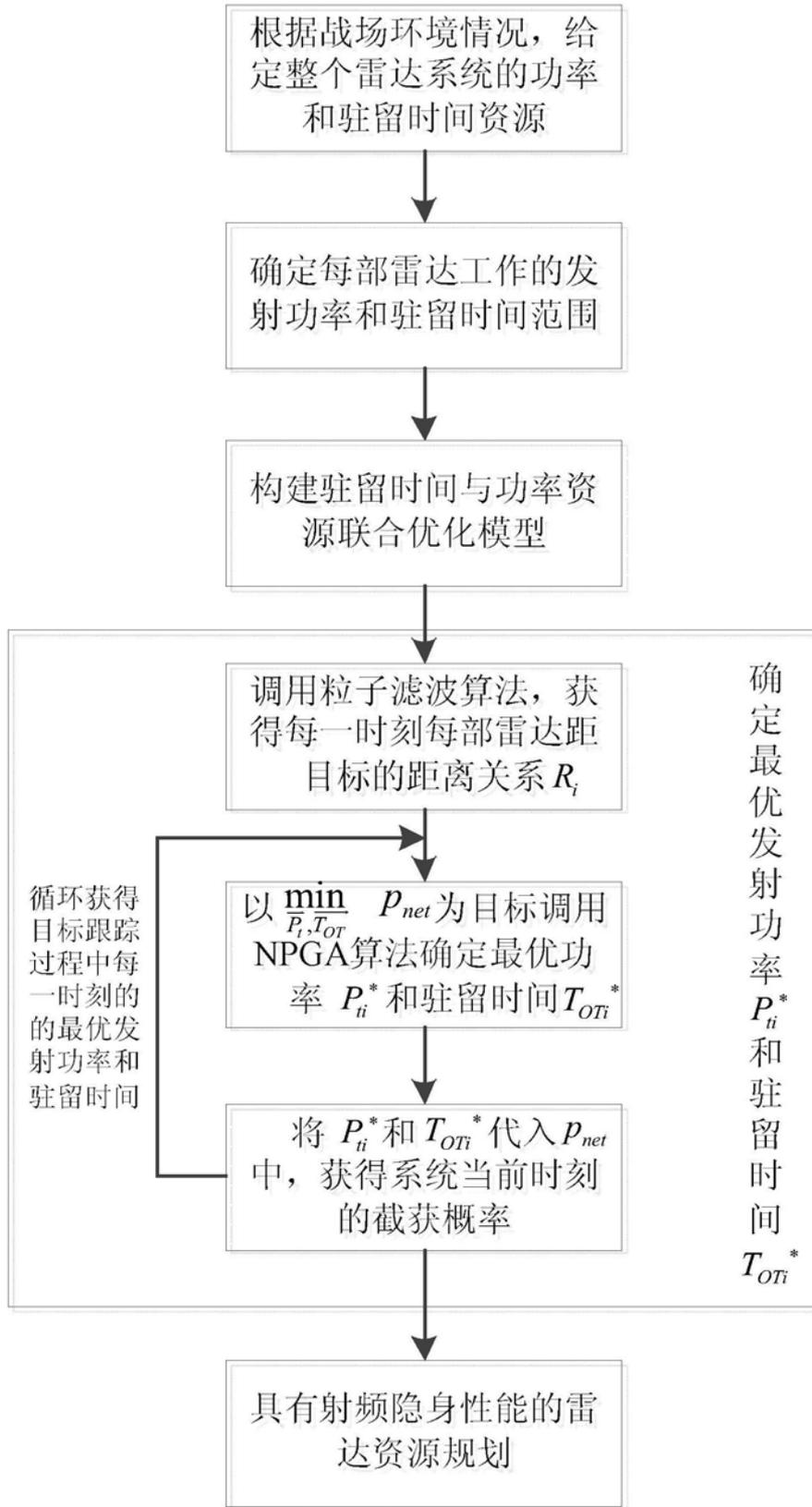


图1

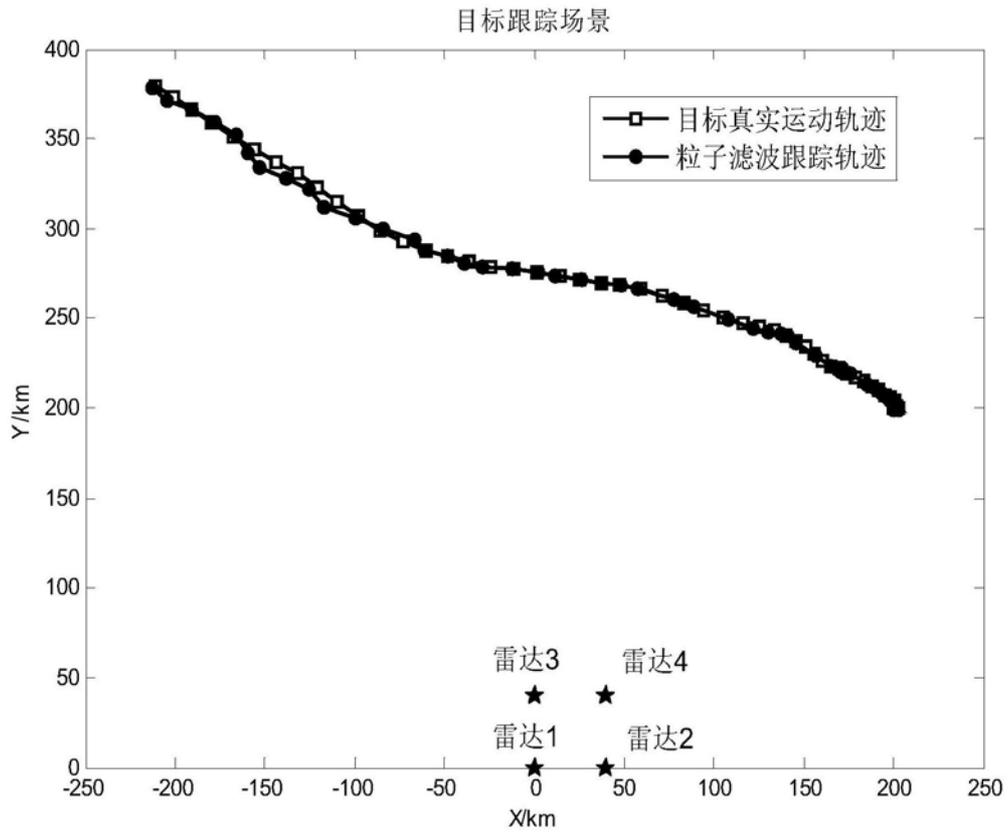


图2

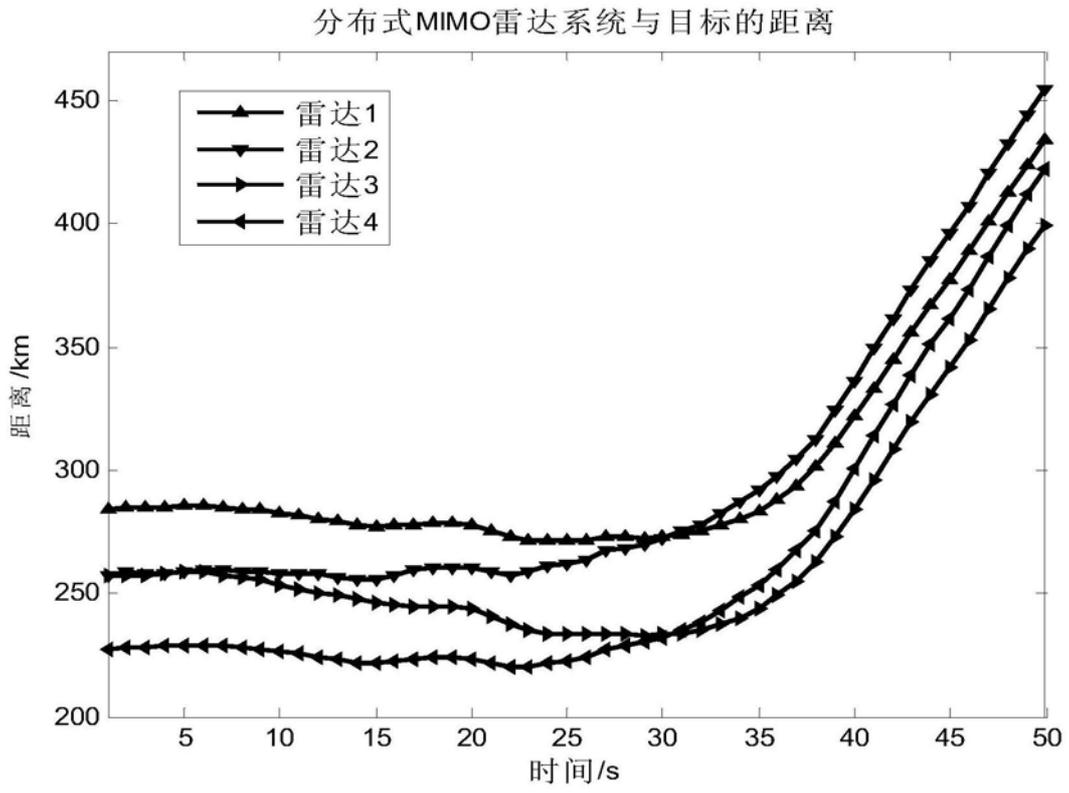


图3

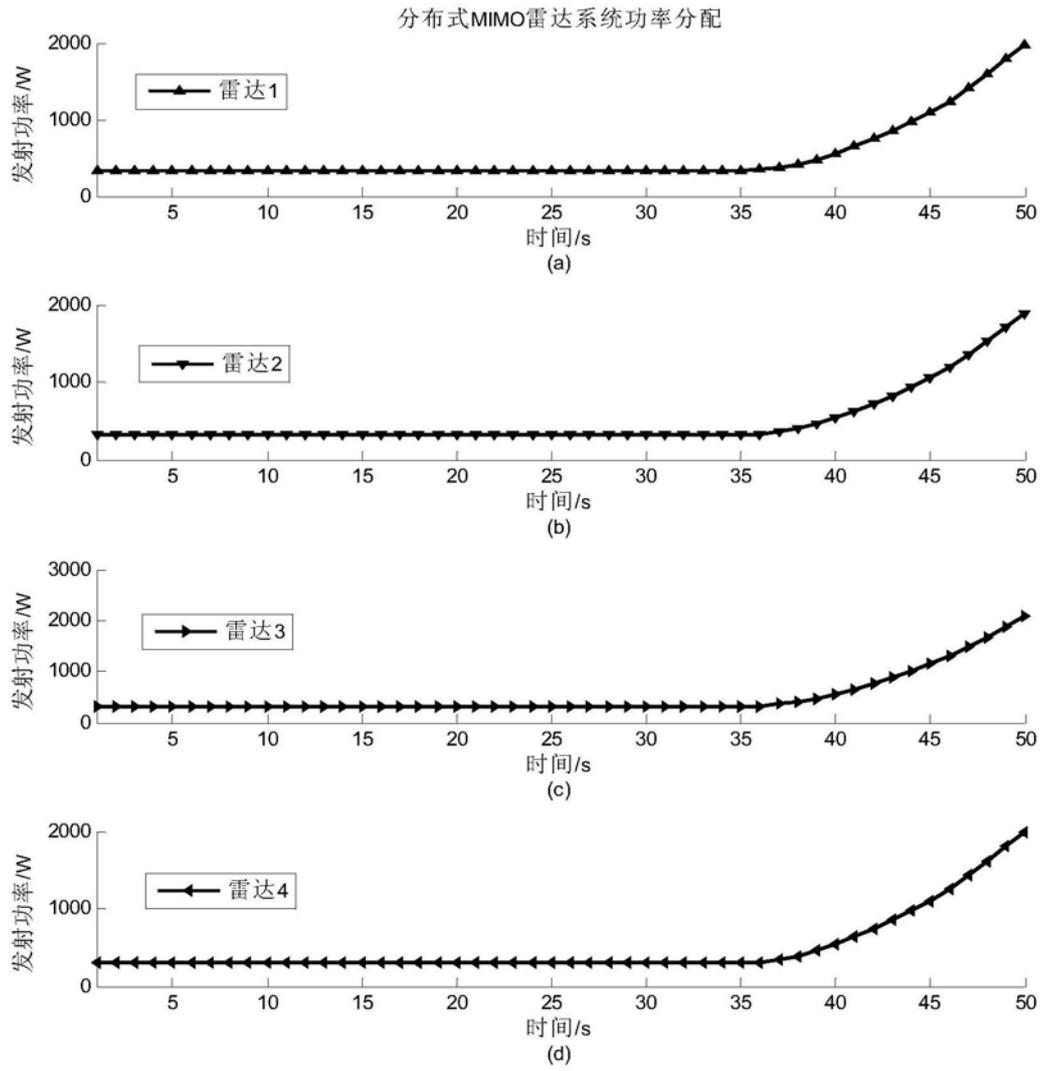


图4

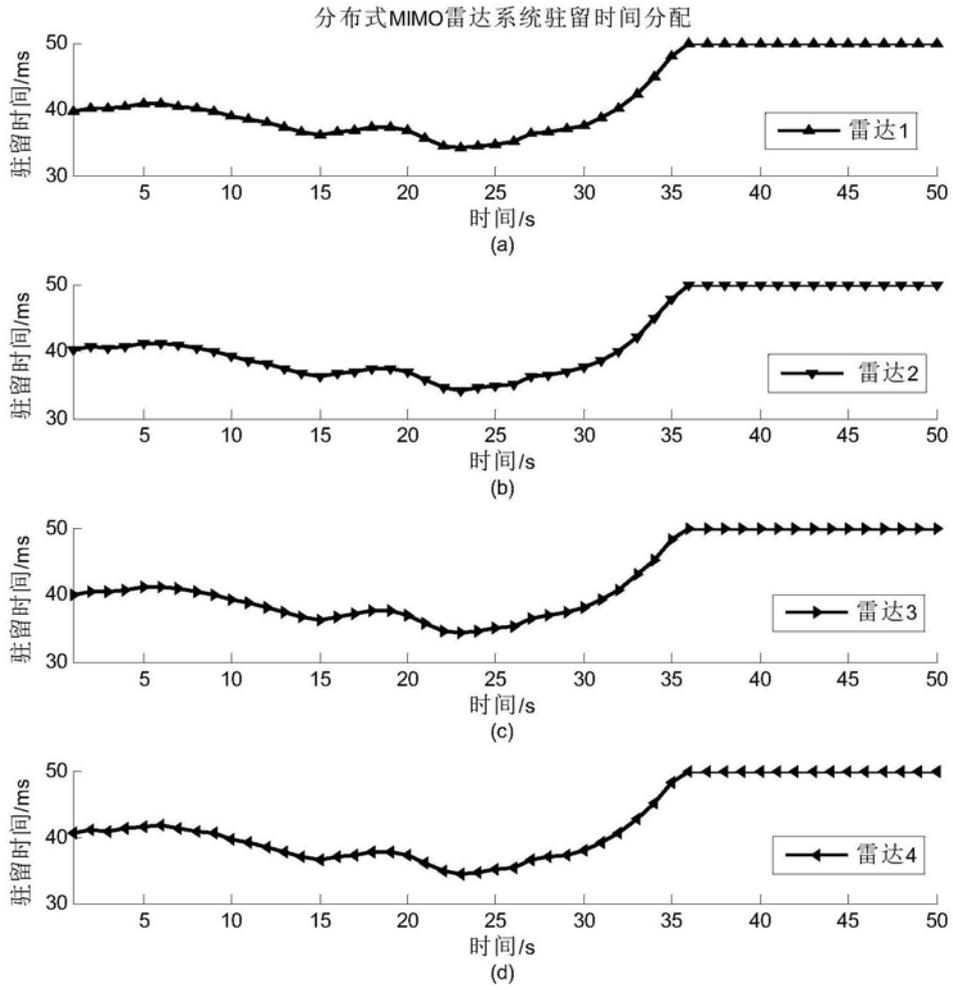


图5

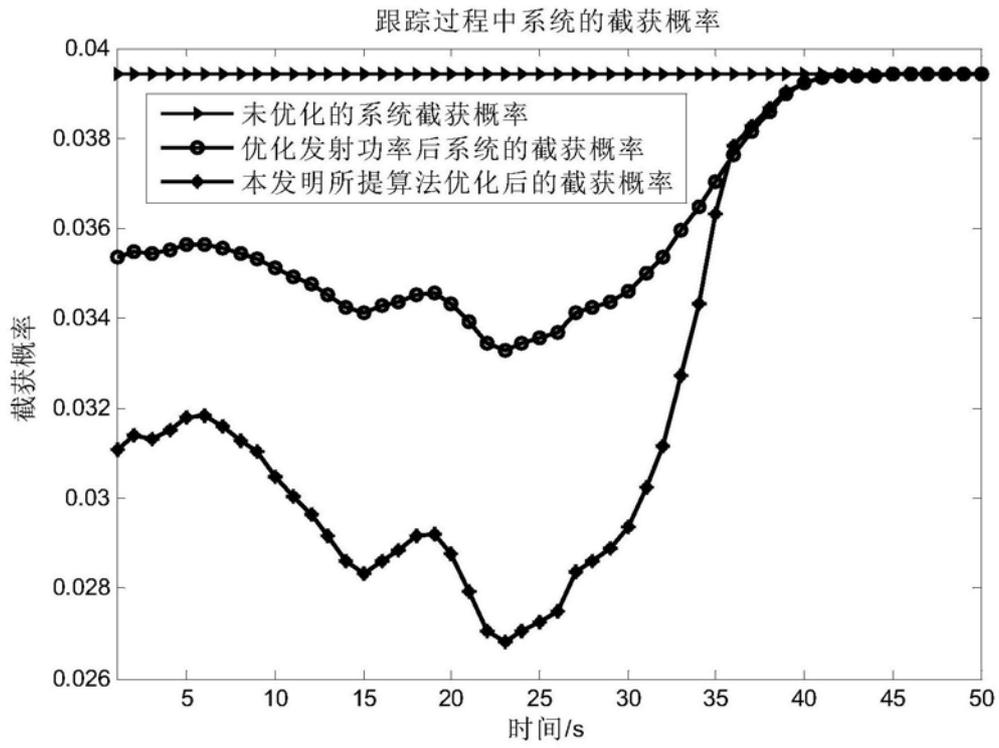


图6