

直升机载相控阵雷达波束波形联合 自适应调度算法研究

薛广然, 郝蕴天, 朱永杰, 李瑞东

(西安电子工程研究所, 西安 710100)

摘要: 孔径分割技术和波形捷变能力让直升机雷达可同时形成多个波束完成不同功能, 并根据不同需求选择不同波形, 因此对雷达资源管理提出更高的要求; 综合考虑时间资源、能量资源、孔径资源的约束下, 提出一种适合于多子阵直升机载相控阵雷达的波束波形联合自适应调度算法, 对雷达波束和波形进行有效调度, 并通过与传统自适应调度算法进行仿真对比, 证明了该算法在调度能力、能量节约等方面的先进性。

关键词: 孔径分割; 多波束; 多波形; 自适应调度

Research on Joint Adaptive Scheduling Algorithm of Beam and Waveform for Helicopter-borne Phased Array Radars

Xue Guangran, Xi Yuntian, Zhu Yongjie, Li Ruidong

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the aperture partition and the ability of waveform agility, helicopter-borne radar can form multi-beams to perform different functions at the same time, using different waveform according to different situations, which propose a higher expectation for radar resource management. Considering time, energy and aperture resource, a joint adaptive scheduling algorithm of beam and waveform which adapts to the Helicopter-borne Phased Array Radars is proposed. Comparing with the traditional one, the algorithm is proved effect and advance by simulations.

Keywords: aperture partition; multi-beam; multi-waveform; adaptive scheduling

0 引言

直升机载相控阵雷达采用孔径分割技术, 将阵面按象限均匀、对称地划分为多个子阵, 每个子阵接一个接收机通道。这样雷达就可以形成多个独立收发波束, 同时跟踪多个目标、搜索不同空域、完成不同功能^[1]。同时波束捷变能力让相控阵雷达可根据不同的任务及目标特性使用不同的波形, 以达到更好的效果。

国内外学者在相控阵雷达资源管理研究方面做了大量研究。文献[2-3]中 Huizing 提出了时间窗的概念并加以应用。文献[4-5]进行更深入的研究, 提出加时间窗的自适应调度算法, 并给出数学模型。但这些算法都是针对单波束工作模式的相控阵雷达, 不能满足直升机载相控阵雷达多波束、多功能、多波形的需求。为此本文在前人研究的基础上考虑任务目标的距离及目标散射截面积(RCS)等参数, 提出了基于孔径分割的波束波形联合自适应调度算法。

1 建立任务模型

直升机雷达任务模型应包含一个波束驻留的所有信息, 包括任务类型、执行时间、所用波形、作用距离等, 可建立如下雷达驻留任务模型:

收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-13。

作者简介: 薛广然(1989-), 男, 吉林扶余人, 硕士, 助理工程师, 主要从事二维相控阵雷达资源管理方向的研究。

郝蕴天(1991-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事雷达信号处理方向的研究。

$$task = \{v, et, l, w, d, \sigma, \tau, \omega_s, \omega_m\} \quad (1)$$

任务模型中 $task$ 表示任务的参数集合, 其中 v 表示任务的工作方式优先级, et 表示雷达任务的期望执行时间, l 表示任务驻留时间长度, w 代表任务时间窗大小, d 为任务目标的估计距离, σ 为任务目标 RCS 估值, τ 为雷达任务实际执行时间, ω_s 代表雷达任务执行所用波形编号, ω_m 为雷达执行任务时雷达孔径占用情况。

根据经验, 典型的应用在机载相控阵雷达上的孔径划分技术都将阵面分为 4 或 8 个子阵, 比如美国装配 F-22 战机的 AN/APG-77 和欧洲的 AMSAR。图 1 所示为 AN/APG-77 的孔径划分方式。 ω_m 定义为四位二进制数, 每一位代表一个子阵的工作情况, “1”代表该子阵被占用, “0”代表该子阵空闲。那么 ω_m 的取值可以有以下几种情况: $\omega_m = 1111$, 即雷达处于全阵工作模式; $\omega_m = 1100$ 或 $\omega_m = 0011$, 雷达处于半阵工作模式; $\omega_m = 0001$, $\omega_m = 0010$, $\omega_m = 0100$ 或 $\omega_m = 1000$, 表示雷达处于四分之一阵工作模式。

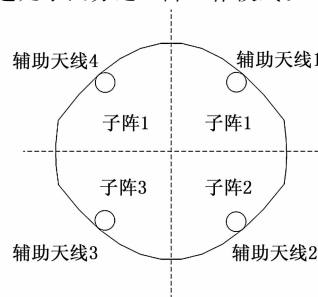


图 1 AN/APG-77 的孔径分割前视图

根据雷达作用距离方程可知,随着雷达子阵工作数量的增加,雷达作用距离也会增大。如果雷达四分之一阵工作模式的作用距离为 $R_{1/4}$,则雷达的半阵工作模式作用距离 $R_{1/2} = 1.68R_{1/4}$,全阵工作模式作用距离 $R_1 = 2.83R_{1/4}$ 。

2 算法描述

波束波形联合自适应调度算法在时间资源、能量资源和孔径资源的约束下遵循以下原则:综合优先级高的任务优先调度;尽可能多的利用时间资源;任务执行时间尽可能的接近期望执行时间;充分利用雷达孔径资源;尽可能节约雷达能量资源。图 2 为基于孔径分割的波束波形联合自适应调度算法流程图。算法具体步骤描述如下:

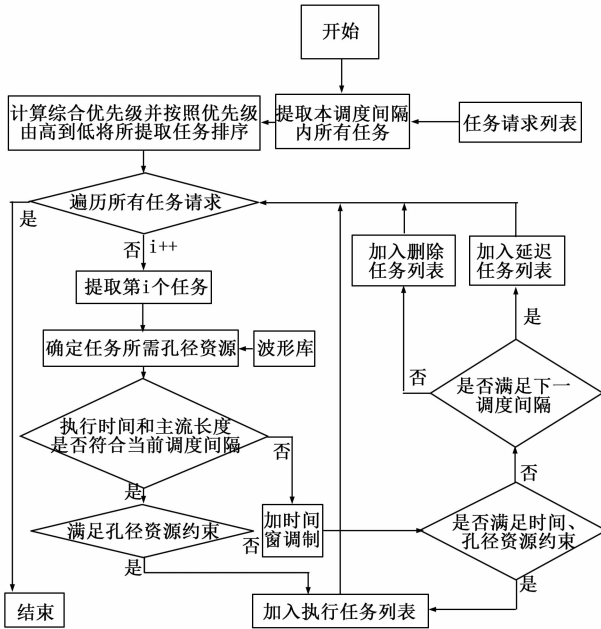


图 2 波束波形联合自适应调度算法流程图

步骤 1: 从任务请求列表中提取满足 $(j-1)T_{SI} \leq et \leq jT_{SI}$ 的任务,即满足期望执行时间在本调度间隔内,其中 j 为调度间隔序号, T_{SI} 为调度间隔长度。同时将上一个调度间隔的延迟任务加入本调度间隔的任务请求列表并清空延迟任务列表。

步骤 2: 计算 Task 中每个任务的综合优先级。综合优先级计算准则^[6-7]:

$$v = [\lambda \cdot NP + (M + 2 - \lambda)ND] / (M + 1) \quad (2)$$

其中: M 为请求任务个数。 ND 和 NP 分别为此任务在截止期和工作方式优先级排列中的序号,是 $[1, M + 1]$ 范围内的自然数,其中截止期排序按由小到大排序,工作方式优先级排序按由高到低排序。

MEDF 准则,即 $\lambda = 1$ 时,把任务截止期作为首要考虑因素;

MHPF 准则,即 $\lambda = M + 1$ 时,把工作方式优先级作为首要考虑因素;

HPEDF 准则,即 λ 在 1 和 $M + 1$ 之间时,两种因素折中考虑。

将 Task 中任务按照综合优先级从高到低排序。 $\omega_{task} = \{task_1, task_2, \dots, task_m\}$, m 为本调度间隔的待调度任务数。

步骤 3: 从待调度任务列表中提取第 i 个任务,根据任务

目标距离估值确定任务所需雷达孔径资源情况,若 $R_{1/2} \leq d \leq R_1$ 则雷达孔径占用情况 $\omega_m = 1111$; 若 $R_{1/4} \leq d \leq R_{1/2}$, 则 $\omega_m = 1100$ 或 $\omega_m = 0011$; 若 $R_{1/4} \leq d \leq R_{1/2}$, 则 $\omega_m = 0001, \omega_m = 0010, \omega_m = 0100$ 或 $\omega_m = 1000$ 。

同时根据雷达任务类型或目标的 RCS 估计值在波形库 $\omega_{waveform} = \{\omega_{wave_1}, \omega_{wave_2}, \dots, \omega_{wave_h}\}$ 中选取所需波形。其中跟踪任务^[8-9]波形选择方法如下:

设 k 时刻使用波形 $\omega_{wave_l} (1 \leq l \leq n)$ 的预估目标回波信噪比为 $S_{ave}(t_k, \omega_l)$, 则:

$$S_{ave}(t_k, \omega_l) = \frac{K_0^2 \tau_c(\omega_{wave_l}) \hat{\sigma}_{ave}^{\wedge}(k) G_{sc}(R_k) (\Sigma_k)^4}{2R_k^4} \quad (3)$$

$$K_0 = \sqrt{\frac{2PG^2\lambda^2}{(4\pi)^3 Lk_0 T_0 F_n}} \quad (4)$$

其中: $\tau_c(\omega_{wave_l})$ 为波形 ω_{wave_l} 的脉冲宽度; R_k 为雷达距离波门的中心距离; Σ_k 为天线和波束的电压方向图; G_{sc} 为距离雷达 R 处的灵敏时间控制增益。

若目标 RCS 服从 Swerling3 型分布,其理论检测概率计算公式为:

$$P_D(\omega_{wave_l}) = \left[1 + \frac{2S_{ave} T_H}{(S_{ave} + 2)^2} \right] \exp \left[-\frac{2T_H}{S_{ave} + 2} \right] \quad (5)$$

其中: T_H 为雷达检测门限, $T_H = 10 \log_{10}(-\ln P_{fa})$ 。具体方法参照文献 [10]。

对于雷达跟踪波形的选择要满足一定的检测概率,即

$$P_D(\omega_{wave_l}) \geq P_{dTH} \quad (6)$$

式中, P_{dTH} 为检测概率门限。在满足条件的波形中选择能量消耗最小的波形;若没有满足条件的波形则选则发射能量最大的波形。

步骤 4: 确定任务驻留时间是否与其他已执行任务冲突,如果没有冲突转步骤 5; 如果有冲突,转步骤 6。

步骤 5: 确定任务所需孔径资源是否已被占用,如果任务所需孔径资源为半阵,则按照先上半阵后下半阵的顺序查看;如果所需孔径为四分之一阵,则按照第 1、第 2、第 3、第 4 子阵的顺序查看。如果满足孔径资源限制则加入执行列表并转步骤 2; 如果不满足,则转步骤 6。

步骤 6: 加时间窗调制,即在满足 $\max\{et - \omega, (j-1)T_{SI}\} \leq \omega \leq \min\{et + \omega, jT_{SI}\}$ 的情况下再次确定任务驻留是否满足步骤 4 和步骤 5 中的约束条件,如果满足则加入执行列表并转步骤 2; 如果不满足其中任意一条件则转步骤 7。

步骤 7: 确定任务是否满足 $et + \omega \geq jT_{SI}$,即满足下一调度间隔,如果满足则将该任务加入延迟列表;否则加入删除列表。转步骤 2。

3 算法仿真及结果分析

仿真场景中雷达采用对称四子阵的孔径分割方法,设置雷达任务请求包括敌我识别、高优先级跟踪、中优先级跟踪、通信、低优先级跟踪和搜索六种任务类型,其工作方式优先级依次降低。雷达波形库有编号 1~7 共 7 种波形,其中编号 1~4 为跟踪波形、5 为搜索波形,其波形参数如表 1 所示;编号 6 和 7 波形分别为敌我识别任务波形和通信任务波形。假设雷达最大作用距离为 20 km,即 $R_1 = 20$ km,则可设 $R_{1/2} = 12$ km, $R_{1/4} = 7$ km。仿真任务目标距离为 (2 km, 20 km) 内的随机数。一个调度间隔长度设为 50 ms。

表 1 任务请求参数

波形	1	2	3	4	5
脉冲宽度/ μs	8.5	12.4	16.8	20.6	12

在仿真场景 1 中, 设置一个调度间隔的任务请求, 任务请求参数如表 2 所示。分别用传统单波束自适应调度算法和基于孔径分割的波束波形联合自适应调度算法分别对雷达任务进行调度并对比。

表 3 和 4 分别为两种调度算法的调度结果。由调度结果可以看出, 传统自适应调度算法成功调用了 5 个任务请求, 雷达全部采取全阵工作模式, 跟踪任务波形全部采取 4 号波形; 波束波形联合自适应调度算法将任务请求全部成功调度, 雷达用不同的子阵同时完成不同的功能任务, 跟踪任务根据不同目标要求采用不同的跟踪波形。由对比可知, 波束波形联合自适应调度算法有更大的任务调度容量, 可根据目标的不同合理的分配孔径资源和能量资源, 具有更好的自适应性, 并节约更多的雷达能量资源。

表 2 任务请求参数

序号	工作方式 优先级	期望执行 时间/ms	任务驻留 时间/ms	任务目标距离 估值/km	任务目标 RCS 估值/ m^2
1	6	10	10	14	—
2	5	36	10	10.2	1.7
3	4	16	15	9.6	2.1
4	4	30	15	5.5	3
5	3	34	15	6.3	—
6	1	8	5	—	—
7	1	18	5	—	—
8	1	22	5	—	—

表 3 传统自适应调度算法调度执行结果

序号	实际执行时间/ms	孔径占用情况	所用波形序号
1	10	1111	6
2	36	1111	4
3	20	1111	4
6	0	1111	5
7	5	1111	5

表 4 本文算法调度执行结果

序号	实际执行时间/ms	孔径占用情况	所用波形序号
1	10	1111	6
2	36	1100	3
3	20	1100	2
4	30	0010	1
5	34	0001	7
6	0	1111	5
7	5	1111	5
8	22	0011	5

仿真场景 2 中, 对两种调度算法在不同任务请求数量情况下进行仿真及性能对比。任务请求中 6 种任务的请求数量比例为 2:1:2:2:3:10, 最大任务请求数为 400; 每种任务请求仿真 20 个调度间隔, 即仿真时长为 1 s, 任务期望执行时间随机出现在仿真时间内, 任务目标的 RCS 估计值为 (0.5 m^2 ,

3 m^2) 内的随机数, 分别进行 100 次蒙特卡洛实验分别对调度任务丢失率 (SDR)、平均时间利用率 (TUR)、系统能量消耗率 (ECR) 和平均时间偏移率 (ATSR) 进行统计计算, 最后取其平均值。仿真结果如下:

图 3 为两种调度算法的任务调度丢失率的对比图, 由图 3 可以看出调度丢失率随着任务请求数的增加不断增大, 但基于孔径分割的波束波形联合自适应调度算法任务调度丢失率一直都小于传统自适应调度算法, 体现了更好的调度性能。

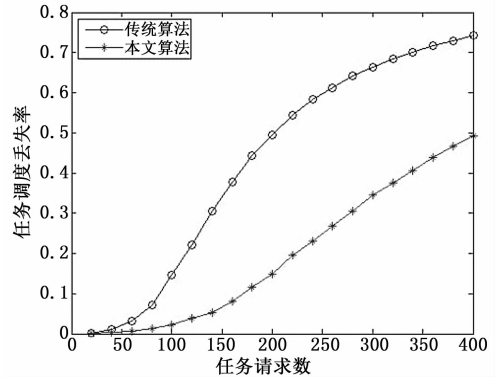


图 3 任务调度丢失率对比图

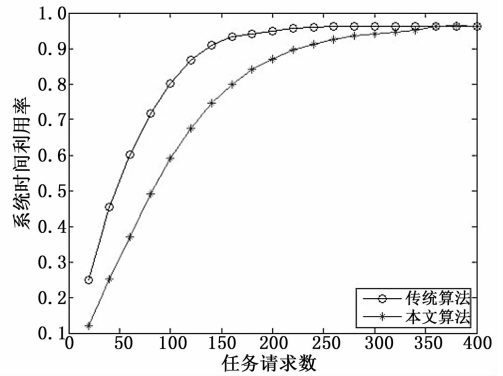


图 4 系统时间利用率对比图

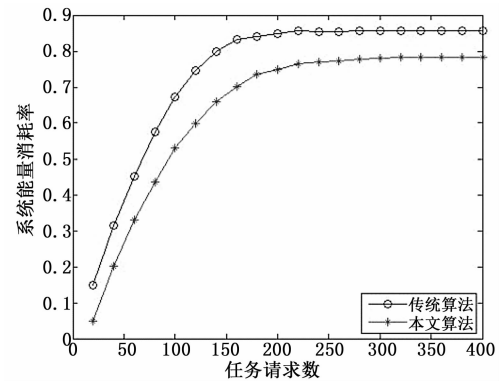


图 5 系统能量消耗率对比图

图 4 为两种调度算法的系统时间利用率对比图, 由于本文调度算法有 4 个子阵, 相当于有 4 个时间轴, 所以开始任务数量较少时会有子阵时间资源空闲, 时间利用率相对较低, 但随着任务数量的增加且逐渐达到饱和, 两种算法的时间利用率逐渐趋于相等, 稳定值为 0.96。

由图 5 可知相同任务请求数的条件下, 本文算法能量消耗

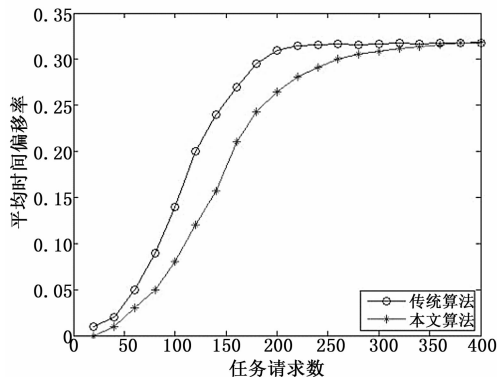


图 6 平均时间偏移率对比图

要明显低于传统调度算法，这是因为本文调度算法根据不同目标参数来合理分配孔径资源及波形，尽可能的保证精度的情况下节约了能量资源。

图 6 为两种算法的平均时间偏移率对比图，在任务请求不多时，本文调度算法中有相对充裕的时间资源供任务选择，所以偏移率相对较小，但逐渐调度达到饱和，两种调度算法的平均时间偏移率逐渐趋于相等。

4 结论

综上所述，基于孔径分割的波束波形联合自适应调度算法在时间、能量、孔径资源的约束下有效地对任务请求进行调度，并合理地分配孔径及波形。通过仿真对比，该算法在调度任务丢失率 (SDR)、平均时间利用率 (TUR)、系统能量消耗

(上接第 151 页)



图 6 访问 HDFS 服务器需要证书

在 PKI 中，CA 中心并没有像 Kerberos 中 KDC 一样与 Hadoop 集群结合在一起，作为第三方认证机构，集群和客户端只需向 CA 中心申请得到自己的证书，在以后的运行中可以使用证书来证明身份的合法性，CA 中心只需要定期为集群和客户更新证书即可，这样即使 CA 中心崩溃，Hadoop 集群也可以在证书有效期内正常运行。

在 Kerberos 体系中 KDC 如果被攻破，则集群中的密钥将被攻击者获取，集群中信息对于攻击者来说是透明的。基于 PKI 的认证体系一般是采用第三方的权威认证机构 CA 提供身份认证，安全性相比于自己建立在 Hadoop 集群中的 KDC 要高出很多，被攻击获取整个集群密钥的可能性很小。

Kerberos 采用的是对称密钥加密体制，通信双方采用相同的密钥，如果一方的密钥被获取，则等于另一方的密钥也被攻击者得到。而 PKI 采用的是非对称密钥加密体制，即使攻击者获取了一对密钥中的一个，也不能推导出对应的另一个密钥，在一定程度上提高了系统的安全性。

率 (ECR) 和平均时间偏移率 (ATSR) 4 个指标上，调度性能均优于传统自适应调度算法。

参考文献:

- [1] Xue G R, Du Z C, Wang W. Multi-beam Dwell Adaptive Scheduling Algorithm for Helicopter-borne Radar [A]. 2014. IEEE ITAC [C]. Chongqing, 401-404.
- [2] Huizing A G, Bowmen A A F. An efficient scheduling algorithm for a multifunction radar [A]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology [C]. Boston, MA, 1996: 359-364.
- [3] Huizing A G, Bosse E. A high-level multifunction radar simulation for Studying the Performance of multisensor Data fusion systems [A]. SPIE Conference of Signal Processing Sensor Fusion Target Recongnition [C]. 1998: 129-138.
- [4] 曾光, 卢建斌, 胡卫东. 多功能相控阵雷达自适应调度算法研究 [J]. 现代雷达, 2004, 26 (6): 14-18.
- [5] 卢建斌, 胡卫东, 郁文贤. 多功能相控阵雷达实时驻留的自适应调度算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (12): 1981-1984.
- [6] 胡卫东, 郁文贤, 卢建斌. 相控阵雷达资源管理的理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [7] 陈升来. 机载传感器管理中的目标优先级评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3292-3294.
- [8] 桑成伟, 徐毓, 张楠, 等. 一种机动目标跟踪算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (10): 1398-1400.
- [9] 钟德华, 夏翠艳, 宋启敏, 等. 多目标跟踪算法的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (6): 846-852.
- [10] 严超, 王彬彬, 畅言. 相控阵雷达目标跟踪下的自适应波形选择 [J]. 电子科技, 2014, 27 (5): 12-14.

原有的安全体系中客户端与 HDFS 之间进行通信采用 HT-TP 协议，数据采用明文传输，新的安全体系采用 HTTPS 协议进行客户端与 HDFS 之间的通信，HTTPS 协议是“HT-TP+SSL”的缩写，就是在 HTTP 协议的基础上对数据进行 SSL 加密，为通信双方提供安全的通道，没有相应的密钥即使攻击者截获传输的数据也没有用，只能得到一堆无意义的乱码。

6 结束语

随着云计算应用的越来越多，人们对它的安全性要求越来越严格，对云计算安全性的研究变得越来越重要。本文通过深入研究原有的 Kerberos 认证体系，提出了原有安全认证体系的缺陷，并为 Hadoop 云平台设计了全新的安全认证体系，相比原有 Kerberos 认证体系具有更高的安全性，使得 Hadoop 集群更加难以被攻破，客户端与集群间采用 HTTPS 协议也使得数据传输过程更为安全，为提高云平台的安全性提供了一个新的方案。

参考文献:

- [1] White T. Hadoop 权威指南 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 陆嘉恒. Hadoop 实战 (第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 陈贞. HDFS 环境下的访问控制技术 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [4] 林毅霖. 基于 PKI 的身份认证系统研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.
- [5] 盛宇伟. 云计算环境下 CA 认证中心的研究与设计 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [6] 陈军. 基于 PKI 的身份认证协议的研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.