

文章编号: 1672-2892(2010)04-0383-05

相控阵雷达系统最大跟踪能力研究

欧鑫, 顾杰, 龙晓波

(西南电子设备研究所 电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要: 相控阵雷达系统的最大跟踪能力是相控阵系统的重要指标, 也是边跟踪边搜索(TAS)工作模式的研究基础。为了从工程应用的角度深入分析该性能指标, 本文在 Singer 模型基础上, 分析雷达跟踪的重访时间与工程测角误差的关系, 并且分析在最小检测信噪比(SNR)情况下的跟踪驻留时间。通过对多目标时的统计分析, 给出了平均重访时间和平均驻留时间, 在此基础上, 给出稳态时的最大跟踪能力闭和解析式。最后对非稳态的情况进行了分析, 得到相应的雷达饱和状态解析式。基于上述分析, 利用 VC++ 建立仿真平台, 通过仿真验证了相关结论的正确性。

关键词: 相控阵; 重访时间; 最大跟踪能力

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

Maximum tracking capacity of phased-array radar system

OU Xin, GU Jie, LONG Xiao-bo

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, SWIEE, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: Maximum tracking capacity of phased-array radar is not only a key system index, but also the base of Track-And-Search(TAS) mode. In order to analyze the parameter from an engineering aspect, firstly, the relationship between revisit-time and engineering measurement error was researched, and tracking illuminating time with minimum Signal to Noise Ratio(SNR) requirement was analyzed in detail with the assumption of Singer model. Secondly, with the help of statistic analysis under multi-target environment, the statistic mean revisit-time and the statistic mean illuminating time were given to compute the maximum tracking capacity of phased array radar under saturation state. Furthermore, a formula was given to compute dynamic tracking under radar saturation state. Lastly, a simulation software was developed by VC++ and the related conclusions were validated on the simulation software.

Key words: phased-array; revisit time; maximum tracking capacity

相控阵雷达具有灵活、快速的波束捷变能力, 它能在计算机控制下, 瞬间完成对多目标进行跟踪和区域搜索功能, 目前, 已广泛应用于军事领域。不同的资源调度算法直接决定了多功能雷达系统的跟踪能力优劣^[1-5]。然而如何确定相控阵雷达系统(本文中所指均为单阵面, 收发共用天线孔径系统)的最大跟踪能力? 在进一步分析之前, 首先给出最大跟踪能力的定义, 即能保证一定跟踪精度要求下的最大跟踪目标个数。S.N.Salinger^[6]最早从时间资源的角度考虑, 在给定数据率和驻留时间的情况下, 给出了其最大跟踪目标数目。C.Y.Yang^[7]等人则在 G.Van Keuk^[8]提出的最优搜索模式基础上, 给出了几种最大跟踪目标个数的约束。本文则在前人基础上, 结合工程实际, 总结并提出一个研究该问题的方法。

1 影响跟踪目标个数的因素

影响相控阵雷达跟踪目标个数的主要因素就是时间资源和能量资源。本文的基本思想: 如果分析清楚了能量与时间的关系, 将二维问题转化为一维问题, 然后再利用时间资源分析方法, 就可以得到最大的跟踪目标个数。

由于工程应用中雷达发射机或 TR 组件往往工作于饱和状态, 能量资源在重频固定、波形固定的情况下, 可以用驻留时间来描述, 即能折算到时间资源中来考虑。因此, 跟踪驻留时间的大小决定了信噪比的大小。而当跟踪驻留时间一旦确定, 系统的测量误差要求则是由数据率来决定。

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2010-03-09

基于上述分析可知,如果跟踪目标的重访时间越长,系统的跟踪能力越大;跟踪每个目标的驻留时间越短,系统的跟踪能力也越大。

1.1 重访时间和驻留时间分析

假设目标的机动性满足 Singer 模型,在 Kalman 滤波情况下,跟踪重访时间间隔可表示为^[8-9]:

$$T = 0.4P_D \left(\frac{\sigma_0 \sqrt{\tau_m}}{\sigma_m / R} \right)^{0.4} \frac{(\sigma_p / \sigma_0)^{2.4}}{1 + 0.5(\sigma_p / \sigma_0)^2} \quad (1)$$

式中: P_D 表示检测概率; σ_p 是跟踪预测方差; σ_0 是实际测量误差; τ_m 是目标机动性的相关时间(s); σ_m 加速度的标准差(m/s²); R 为目标距离(m); c 为常数 2.772 6。Blackman^[9]定义了角度跟踪误差为:

$$\alpha = \frac{\sigma_p}{\theta} \quad (2)$$

式中 θ 是 3 dB 波束宽度(可以假设在方位和俯仰上都相同,也可以分别计算方位跟踪误差 α_a 和俯仰跟踪误差 α_p)。将式(2)代入式(1),得

$$T = 0.4P_D \left(\frac{\sigma_0 \sqrt{\tau_m}}{\sigma_m / R} \right)^{0.4} \frac{(\alpha \cdot \theta / \sigma_0)^{2.4}}{1 + 0.5(\alpha \cdot \theta / \sigma_0)^2} \quad (3)$$

由式(3)可知,其它参数不变时,随着 α 的增大, T 也增大。如果给定最大容许误差为 $\alpha_{\max} = \min(\alpha_{a\max}, \alpha_{p\max})$, (其中 $\alpha_{a\max}$ 和 $\alpha_{p\max}$ 分别表示方位和俯仰角上的最大容许角度误差),则

$$T \leq T_{\alpha_{\max}} \quad (4)$$

为便于计算,假设目标 RCS 起伏满足 SwerlingI 模型,则 $P_D = P_{fa}^{1+R_{SN}}$ 。当虚警率给定后,检测概率越高,则要求 SNR 越高,由式(3)可知,对应的重访时间越大;反之,重访时间越小。

根据跟踪雷达方程,跟踪一个目标需要花费的信噪比为:

$$R_{SN} = \gamma \frac{t_0}{R^4}, \quad \gamma = \frac{P_{av} G A_e \sigma E(n)}{(4\pi)^2 K T_0 F L} \quad (5)$$

式中: P_{av} 表示发射机平均功率(W); G 为天线功率增益; A_e 为有效天线孔径(m²); σ 为 RCS(m²); $E(n)$ 表示积累损失因子(≤ 1 , 对于相干积累 $E(n)=1$, 对于非相干积累 $E(n)<1$); K 为波尔兹曼常数; T_0 为标准温度(290 K); F 为接收机噪声系数; L 为总损耗; t_0 则表示驻留时间。如果始终保证 $R_{SN} = R_{SN\min}$, 并且其余参数不变,则 t_0 就是 R 的函数,这种假设在工程使用中是合理的。因此,给定 $R_{SN\min}$, 对应得到最小检测概率 $P_{D\min}$, 将其分别代入式(4)和式(5), 则重访时间和驻留时间需要满足式(6)和式(7), 即

$$T \leq 0.4P_{D\min} \left(\frac{\sigma_0 \sqrt{\tau_m}}{\sigma_m / R} \right)^{0.4} \frac{(\alpha_{\max} \theta / \sigma_0)^{2.4}}{1 + 0.5(\alpha_{\max} \theta / \sigma_0)^2} \quad (6)$$

$$t_0 \geq \frac{R^4}{\gamma} \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_{D\min})} - 1 \right) \quad (7)$$

式(6)和式(7)分别给出了重访时间与驻留时间的约束关系。

1.2 考虑多目标的情况

分析式(6)和式(7)容易发现,当其他参数确知后,它们都与目标的距离有关,这是非常符合实际的,因为侦察空域中的目标相对雷达距离远近不一,对应的重访时间和数据率也应有所不同。但是,它却给计算最大跟踪能力带来问题,如何消除不同距离因素对研究跟踪能力的影响,最自然的想法则是引入统计理论。

如果完成跟踪过程的时间为 t_{Track} , 能同时跟踪 N 个目标(假设目标特性相同),则

$$t_{Track} = \sum_{i=1}^N t_{oi} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_{D\min})} - 1 \right) \sum_{i=1}^N R_i^4 \quad (8)$$

进一步,假设跟踪距离为 $R_1 < R < R_2$, 则

$$t_{Track} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_{D\min})} - 1 \right) \int_{R_1}^{R_2} f(R) R^4 dR \quad (9)$$

这里, $f(R)$ 表示 $R_1 < R < R_2$ 中目标的分布概率密度函数, 最合理的假设是均匀分布, 即 $f(R) = \frac{1}{R_2 - R_1}$, 有

$$t_{\text{Track}} \approx \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_{D_{\min}})} - 1 \right) \frac{N(R_2^5 - R_1^5)}{5(R_2 - R_1)} \quad (10)$$

由式(10)可见, 从统计的角度就可以选出一个平均意义上的最小驻留时间

$$\bar{t}_0 = \frac{t_{\text{Track}}}{N} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_{D_{\min}})} - 1 \right) \frac{(R_2^5 - R_1^5)}{5(R_2 - R_1)} \quad (11)$$

需特别注意, 驻留时间应满足电磁波在 $R_1 < R < R_2$ 中传播的时间要求(如 $R = 200 \text{ km}$ 时, $t \geq 1.333 \text{ ms}$), 故驻留时间应该包含填充时间, 这里取其最大填充传播时间 $\bar{t}_0 + 1.4 \text{ ms}$ 。

类似地, 可以得到统计意义上的最大重访时间:

$$\bar{T} = 0.4P_{D_{\min}} \left(\frac{\sigma_0 \sqrt{\tau_m}}{\sigma_m} \right)^{0.4} \frac{(\alpha_{\max} \theta / \sigma_0)^{2.4} (R_2^{1.4} - R_1^{1.4})}{1 + 0.5(\alpha_{\max} \theta / \sigma_0)^2 1.4(R_2 - R_1)} \quad (12)$$

因此, 根据式(11)和式(12)就得到了统计意义上的最小驻留时间和最大重访时间。

2 雷达饱和分析

2.1 目标处于稳定跟踪阶段

如果所有的目标都处于稳定跟踪阶段, 且 $t_{\text{Track}} = \bar{T}$, 则说明所有的时间都用于了跟踪, 而没有进行搜索, 这时跟踪的目标应该处于饱和状态, 所以

$$N_{\max} = \frac{\bar{T}}{\bar{t}_0 + 1.4} = \frac{2P_{D_{\min}} \left(\frac{\sigma_0 \sqrt{\tau_m}}{\sigma_m} \right)^{0.4} \frac{(\alpha_{\max} \theta / \sigma_0)^{2.4} (R_2^{1.4} - R_1^{1.4})}{1 + 0.5(\alpha_{\max} \theta / \sigma_0)^2 1.4(R_2 - R_1)}}{\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_{D_{\min}})} - 1 \right) (R_2^5 - R_1^5) + 9.8(R_2 - R_1)} \quad (13)$$

式(13)不仅考虑了目标距离分布不同, 而且保证在统计意义情况下, 以最小信噪比对每个目标进行跟踪。将表 1 中一个雷达及目标的相关参数, 代入式(13)得到图 1 所示的结果。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

average transmitting power/W	effective antenna aperture/m ²	false alarm probability	antenna gain/dB	radar cross-section/m ²	receiver noise figure/dB
10 ⁴	0.63	10 ⁻⁶	30	2	3
total loss/dB	coherent accumulation	3 dB beam width/(°)	maximum detection distance/km	minimum detection distance/km	maneuvering target time constant/s
15	$E(n)=1$	2	200	40	10

从图 1 不难发现, 在给定虚警概率后, 当发射功率恒定时, 检测概率越大——需要的 SNR 越大, 也就是驻留时间越长, 那么能够同时跟踪的最大目标个数越小; 反之, 跟踪数目越大。同时, 如果雷达系统需要的测角误差越小, 即数据率越高, 重访时间越短, 同时所能跟踪的目标个数也就越少。显然这 2 个结论都符合工程实际, 因此, 客观地验证了式(13)的正确性。利用该式, 不仅可以分析边跟踪边搜索(TAS)饱和情况, 还能分析边扫描边跟踪(Track-While-Scan, TWS)饱和情况, 能很好地适应各种雷达环境。

2.2 目标由截获转入跟踪阶段

如果考虑目标不是都处于稳定跟踪状态, 而是由截获转入稳定跟踪状态, 则需要更加详细的分析。

在分析之前, 先来考虑截获与稳定跟踪的差别。如果把截获看成稳定跟踪的过渡过程, 其本身也可以用重访时间和驻留时间

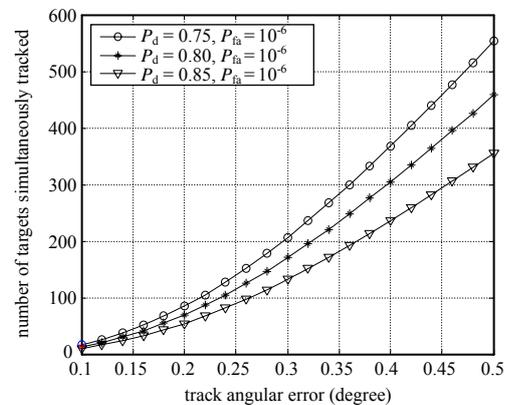


Fig.1 Relationship between the number of tracked targets and angle measurement error
图 1 跟踪目标个数变化关系曲线

来进行描述。不同在于：截获阶段，目标的信息较少，为了获取更多信息，往往会采用3重频解距离模糊等方法，因此，其驻留时间往往比稳定跟踪时长。同时，为了很快对目标进行验证，也会缩短重访时间确保再次验证成功。所以，截获阶段雷达饱和了，在不断转入稳定跟踪过程时，雷达会经历由截获饱和和转为(截获+稳定跟踪)饱和，再转为稳定跟踪饱和过程。

根据上述分析，可将跟踪过程分为截获阶段和稳定跟踪阶段。令 \bar{t}_0^j 表示驻留时间， \bar{T}^j 表示重访时间， $j=1,2$ ，分别表示截获与稳定跟踪阶段。则在第 j 个阶段，花费在每个目标的跟踪时间比率为：

$$r_j = \frac{\bar{t}_0^j}{\bar{T}^j} \quad (r_2 < r_1) \quad (14)$$

将时间轴分为一系列的时隙 T_{Sl} (截获一个目标所需要的时间长度)， N_k 表示在第 k 个时隙同时跟踪的目标数，令 n_k 表示在这个时隙中，新被截获的目标个数。

假设雷达在第1个阶段就处于截获饱和状态，则第1个调度间隔中，被截获的目标为 $n_1 = 1/r_1$ ，而第2个调度间隔结束时，用于对第1个时隙中已被截获目标进行跟踪，所花费的时间比值为：

$$f_{old} = r_2 n_1 = r_2 / r_1 \quad (15)$$

而第2个时隙中新被截获的目标所花费的时间比值为：

$$f_{new} = 1 - f_{old} = 1 - (r_2 / r_1) \quad (16)$$

同时， f_{new} 也可以看作第2个时隙中花费在截获阶段的时间比值 $f_{new} = r_1 n_2$ ，联合式(15)、式(16)可知：

$$N_2 = n_1 + n_2 = \frac{1}{r_2} \left[1 - \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right)^2 \right] \quad (17)$$

以此类推，可以得到 $N_{max}(t)^{[6]}$ ：

$$N_{max}(t) = \frac{1}{r_2} \left[1 - \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right)^{(t-T_{Sl})/T_{Sl}} \right] \quad (t > T_{Sl}) \quad (18)$$

由式(18)可见，当 $t \rightarrow \infty$ (\rightarrow 表示趋于)时， $N_{max}(t) = \frac{1}{r_2}$ ，即时间足够长后，所有目标都转入稳定跟踪状态，式(18)就等价于式(13)。

为了更清楚说明，根据式(18)和表1参数可以得到图2所示结果。这里调度间隔取200ms，假设截获阶段驻留时间为跟踪阶段的1.5倍，重访时间为跟踪阶段的0.8倍。

图2显示了雷达由截获饱和到稳定跟踪饱和的变化过程。因此，2.2节是2.1节的一个补充，说明了：如果跟踪过程进一步细化，目标的最大跟踪能力在不同状态有不同的表现形式，但随着时间推移，最终结果都是收敛一致的。

3 仿真分析

为了验证上述结论的正确性，笔者利用VC++建立了仿真软件。

在探测空域中随机产生16个目标，每个目标根据不同的序号按匀速直线、水平圆周及三维曲线运动轨迹运行，搜索采用35ms的驻留时间，跟踪则针对两种不同威胁等级的目标设置了精密跟踪和普通跟踪，为了仿真方便，驻留时间均设为35ms(也可以根据距离远近调整驻留时间)，但有不同的数据率(精密跟踪7Hz，普通跟踪3.5Hz)。调度间隔为1000/min(7,3.5)≈140ms。因此，利用式(13)计算可知，最多能精密跟踪4个目标或普通跟踪8个目标。表2给出仿真结果。

由表2可知，该仿真过程中对2号、4号、10号目标进行了精密跟踪，而对16号和14号目标进行了普通跟踪，因此，精密跟踪了3个目标和普通跟踪了2个目标，与之前计算结论吻合，从而验证了上述结论的正确性。

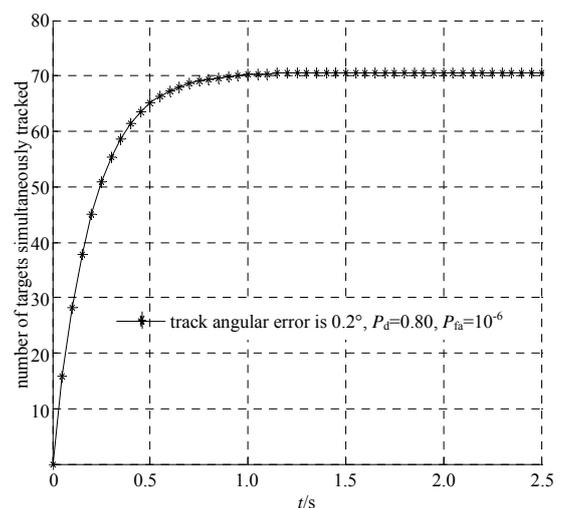


Fig.2 Number of tracked targets varied with time
图2 跟踪目标个数随时间的变化关系曲线

表2 仿真结果
Table2 Simulation results

No.	time/s	event name	cause	expected execution time/s	deadline/s	dwell time/s	update rate/Hz	azimuth/(°)	pitch/(°)
256	8.925	Track	Target 16	8.960	9.118	0.035	3.00	-0.16	-0.00
257	0.960	HP-Track	Target 2	8.963	9.033	0.035	7.00	56.24	11.49
258	8.995	HP-Track	Target 4	8.998	9.068	0.035	7.00	43.23	19.57
259	9.030	HP-Track	Target 10	9.033	9.103	0.035	7.00	-0.15	12.02
260	9.065	Track	Target 14	9.100	9.258	0.035	3.00	-3.17	8.05
261	9.100	HP-Track	Target 2	9.103	9.173	0.035	7.00	56.26	11.46
262	9.135	HP-Track	Target 4	9.136	9.208	0.035	7.00	43.20	19.56
263	9.170	HP-Track	Target 10	9.173	9.243	0.035	7.00	-0.12	12.02
264	9.205	Track	Target 16	9.240	9.398	0.035	3.00	-0.13	-0.00
265	9.240	HP-Track	Target 2	9.243	9.313	0.035	7.00	56.28	11.48
266	9.275	HP-Track	Target 4	9.278	9.348	0.035	7.00	0.17	19.59
267	9.310	HP-Track	Target 10	9.313	9.383	0.035	7.00	-0.06	12.02
268	9.345	Track	Target 14	9.380	9.538	0.035	3.00	-3.14	8.05
269	9.380	HP-Track	Target 2	9.383	9.453	0.035	7.00	56.30	11.47
270	9.415	HP-Track	Target 4	9.418	9.488	0.035	7.00	43.14	19.60
271	9.450	HP-Track	Target 10	9.453	9.523	0.035	7.00	-0.02	12.02
272	9.485	Track	Target 16	9.520	9.678	0.035	3.00	-0.11	-0.00
273	9.520	HP-Track	Target 2	9.523	9.593	0.035	7.00	56.32	11.46
274	9.555	HP-Track	Target 4	9.558	9.628	0.035	7.00	43.12	19.61
275	9.590	HP-Track	Target 10	9.593	9.663	0.035	7.00	0.01	12.02
276	9.625	Track	Target 14	9.660	9.818	0.035	3.00	-3.11	8.05
277	9.660	HP-Track	Target 2	9.663	9.733	0.035	7.00	-56.34	11.45

4 结论

讨论了影响雷达系统跟踪能力的2大因素——时间约束和能量约束。在符合工程实际情况下,将二维问题转化为一维问题进行求解。针对多目标的分布位置不同,通过统计分析,得到了平均最大重访时间和平均最小驻留时间。在此基础上从两个角度分析了雷达饱和情况,给出了相应的解析表达式。通过仿真,验证了对应理论分析的正确性。最大跟踪能力的分析很好地指导了相控阵调度算法的研究,使雷达在饱和情况下,调整资源以应对不同的战术需求。总之,从工程应用角度分析该理论极限,对调度策略研究和工程应用有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] Stromberg D, Grahn P. Scheduling of Tasks in Phased Array Radar[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston: [s.n.], 1996:318-321.
- [2] Stromberg D. Scheduling of Track updates in phased array Radars[C]// Proceedings of IEEE National Radar Conference, Ann Arbor: Univ. of Michigan, 1996:214-219.
- [3] Komorniczak W, Kuczerski T, Pietrasinski J F. The Priority assignment for detected targets in Multi-function Radar[C]// Proc. 13th Int. Conf. Microwaves, Radar, and Wireless Communications, Poland: [s.n.], 2000:244-247.
- [4] Miranda S L C, Baker C J, Woodbridge K, et al. Simulation Methods for Prioritising Tasks And Sectors Of Surveillance[J]. International Journal of Simulation and Process Modeling, 2009, 5(1-2):18-25.
- [5] Chang-Gun Lee, Phil-Su Kang, Chi-Sheng Shih, et al. Radar Dwell Scheduling Considering Physical Characteristics of Phased Array Antenna[C]// Proceedings of the 24th IEEE international Real-time Systems Symposium, Washington: IEEE Computer Society, 2003.
- [6] Sheldon N Salinger. Target-Handling Capacity of a Phased-Array Tracking Radar[J]. IEEE Transactions Aerospace And Electronic Systems, 1972, AES-8(1):43-50.
- [7] Yang C Y, Zhang Z W, Mao S Y, et al. The limit target capacity for the phased array radar[C]// Proceedings of IEE Radar 97, Edinburgh: [s.n.], 1997:788-792.
- [8] Van Keuk G, Blackman S S. On Phased-Array Radar Tracking and Parameter Control[J]. IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1):186-194.
- [9] Samuel Blackman. Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]. Boston: Artech House Publishers, 1999.

作者简介:



欧鑫(1980-),男,重庆市人,硕士,工程师,主要研究方向为相控阵雷达信号处理、数据处理、系统控制与调度等。email:ou_xin@163.com.

顾杰(1974-),男,成都市人,博士,高级工程师,主要研究方向为电子信息工程方向。

龙晓波(1963-),男,成都市人,本科,高级工程师,主要研究方向为相控阵雷达系统、雷达对抗、信号处理等。