

相控阵雷达中的自适应搜索研究

徐 斌,杨晨阳,李少洪,毛士艺

(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘 要: 本文研究了相控阵雷达中的自适应分区搜索算法及性能. 首先,推导了最优分区搜索性能及其与均匀搜索性能的关系,分析了目标强度估计误差对最优分区搜索性能的影响;然后,分别研究了平稳目标分布和非平稳目标分布环境下的自适应搜索方法、最优参数和性能.

关键词: 相控阵雷达; 分区搜索; 自适应; 性能分析

中图分类号: TN958.92 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2001) 12-1719-04

A Study on Adaptive Search Strategy in Phased Array Radar

XU Bin, YANG Chen-yang, LI Shao-hong, MAO Shi-yi

(Dept Of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, an adaptive region search strategy and its performance are studied. Firstly, the optimal search performance is derived, and the relationship between the optimal search performance and the uniform search performance is presented. Next, the influence of the target distribution density's estimation error on the optimal region search performance is analyzed. Finally, adaptive search methods and their optimal parameters and their performance in stationary and nonstationary target distribution environment are investigated.

Key words: phased array radar; region search; adaptive; performance analysis

1 引言

在现有优化和自适应搜索算法中,文献[10]在考虑了文献[1~9]中搜索算法问题的基础上,提出了相控阵雷达中的最优分区搜索算法,在确知区域目标分布信息情况下,实现了目标的最优搜索,同时为获取目标分布信息、自适应调度波束和算法自适应实现提供了可能性.在没有目标分布先验信息的情况下,既然目标分布信息需要通过估计获得的,必然存在目标分布信息的估计误差.目标分布估计误差对搜索性能的影响,平稳和非平稳目标分布环境下自适应搜索的方法和性能等问题却有待研究.这些问题就是本文的研究内容.

2 分区搜索的最优性能

假设:把相控阵雷达的整个警戒空域按一定的规则分为 N 个不同的区域,每个区域编号为 $i (i = 1, 2, \dots, N)$; 每个区域的搜索帧周期、搜索一帧消耗的雷达时间、雷达对各区域内任意目标的检测概率、泊松流目标强度、整个警戒空域的目标强度^[10]分别为 T_{si} 、 T_i 、 Pd_i 、 ρ_i 和 $\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$; 目标一旦进入警戒空域,在被发现之前将停留在警戒空域;各区域的重要性相同;雷达的时间资源全部用于搜索功能.

根据上述假设,由文[10]可知新目标被发现的平均时间

为:

$$\bar{t}_f = \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2} \right) \cdot T_{si} \quad (1)$$

雷达均匀搜索时,各区域的搜索帧周期都为雷达搜索一遍整个警戒区域所花的时间 $\sum_{i=1}^N T_i$, 目标被发现的平均时间为:

$$\bar{t}_{f_{unif}} = \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2} \right) \left(\sum_{i=1}^N T_i \right) \quad (2)$$

根据文[10]提出的最优帧周期进行搜索时,把最优帧周期代入式(1),可得最优搜索性能,即目标被发现的最小平均时间为:

$$\bar{t}_{f_{opt}} = \left(\sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2} \right) \cdot \rho_i \cdot T_i} \right)^2 \quad (3)$$

根据柯西-许瓦兹不等式可得,

$$\left(\sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2} \right) \cdot \rho_i \cdot T_i} \right)^2 \leq \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2} \right) \left(\sum_{i=1}^N T_i \right) \quad (4)$$

当且仅当 T_i 和 $(1/Pd_i - 1/2) \cdot \rho_i$ 的比值都为相同的常数时,不等式取等号.

式(4)说明最优搜索的性能总是优于均匀搜索的性能.

3 平稳目标环境下目标强度估计误差对搜索性能的影响

在没有目标分布先验信息的情况下,目标强度需要通过一定时间内所获得的新目标数估计所得的.估计存在误差,估计误差必然会影响到搜索性能.下面讨论目标强度平稳分布时,目标强度估计误差对搜索性能的影响.

在雷达搜索过程中,雷达应该根据最新估计到的目标分布强度不断地同时更新所有区域的搜索帧周期,使雷达资源按照最新的目标分布情况实现最优分配.假设 T_{upp} 为雷达更新搜索帧周期的周期,简称更新周期,即所有区域的搜索帧周期从某一次更新时刻到下一次更新时刻之间的时间间隔.

当目标强度平稳分布时,利用 T_{upp} 内新发现的目标数估计目标强度的均值和方差分别为:

$$\bar{r}_i = E\{\hat{r}_i\} = E\{N_i(T_{upp})/T_{upp}\} = E\left\{n \cdot \frac{(\hat{r}_i T_{upp})^n}{n!}\right\} / T_{upp} \\ = \hat{r}_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$\sigma_i^2 = E\{(\hat{r}_i - \bar{r}_i)^2\} = E\{[N_i(T_{upp})/T_{upp} - E\{N_i(T_{upp})/T_{upp}\}]^2\} \\ = \hat{r}_i / T_{upp} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

其中, \hat{r}_i 为 T_{upp} 内估计所得的目标强度, $N_i(T_{upp})$ 为 T_{upp} 内估计所得的新目标数,由文[10]可知, $N_i(T_{upp})$ 等于新进入的目标数.

当采用估计所得的目标强度时,文[10]中的最优搜索帧周期为:

$$T_{si} = \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2}} \right) \cdot \frac{\hat{r}_i}{\hat{\lambda}} \cdot T_i \cdot \sqrt{\frac{T_i}{\prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{Pd_i} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\hat{r}_i}{\hat{\lambda}}}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中, $\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^N \hat{r}_i$ 为整个雷达警戒空域目标强度的估计.

令 $P_i = \hat{r}_i / \hat{\lambda}$ 为各区域的实际目标分布概率, $P_i = \hat{r}_i / \hat{\lambda}$ 为通过目标强度估计所得的各区域目标分布概率,并令常数 $C_i = (1/Pd_i - 1/2) \cdot T_i$, 则把式(7)代入式(1),可得:

$$\bar{r}_f = \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot C_i} \right) \left(\prod_{i=1}^N \frac{P_i^2}{\sqrt{P_i} \cdot C_i} \right) \quad (8)$$

令 $P_i = P_i \cdot (1 + \epsilon_i)$, $\epsilon_i = (P_i - \hat{P}_i) / P_i$, 则式(8)为:

$$\bar{r}_f = \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot (1 + \epsilon_i) \cdot C_i} \right) \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot \left(\frac{1}{1 + \epsilon_i} \right) \cdot C_i} \right) \quad (9)$$

根据柯西—许瓦兹不等式可得,

$$\left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot (1 + \epsilon_i) \cdot C_i} \right) \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot \left(\frac{1}{1 + \epsilon_i} \right) \cdot C_i} \right) \geq \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot C_i} \right)^2 \quad (10)$$

当且仅当 ϵ_i 都为零时上式取等号,即只有在目标强度估计误差为零时搜索性能才能达到最优.

下面,定量分析目标强度估计误差对搜索性能的影响.假设 $\epsilon_i \ll 1$, 则式(9)可以简化为:

$$\bar{r}_f = \left[\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot C_i} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_i \right) \right] \left[\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot C_i} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \epsilon_i \right) \right] \\ = \left(\prod_{i=1}^N \sqrt{P_i \cdot C_i} \right)^2 + \frac{1}{4} \left[\prod_{i=1}^N (\sqrt{P_i \cdot C_i}) \cdot \epsilon_i \right]^2 = \bar{r}_{opt} + \bar{r}_f \quad (11)$$

其中, $\bar{r}_{f \min}$ 为最优搜索性能, \bar{r}_f 为目标强度估计误差所导致的性能误差,我们定义为分区搜索性能与最优分区搜索性能之间的“失调”,并希望它越小越好.

假设 ϵ_i 为零均值且互不相关的随机变量(实际上有很小的相关性,假设可以忽略不计),那么,性能“失调” \bar{r}_f 的均值为:

$$E\{\bar{r}_f\} = E\left\{ \frac{1}{4} \left[\prod_{i=1}^N (\sqrt{P_i \cdot C_i}) \cdot \epsilon_i \right]^2 \right\} = \frac{1}{4} \prod_{i=1}^N (P_i \cdot C_i) \cdot E\{\epsilon_i^2\} \quad (12)$$

在平稳目标分布环境下,由 ϵ_i 的定义可知:

$$\epsilon_i = \frac{P_i}{\hat{P}_i} = \frac{P_i - \hat{P}_i}{\hat{P}_i} = \frac{\hat{r}_i / \hat{\lambda} - \hat{r}_i / \hat{\lambda}}{\hat{r}_i / \hat{\lambda}} = \frac{\hat{r}_i - \hat{r}_i}{\hat{r}_i} \quad (13)$$

由式(6)、(12)、(13)可得:

$$E\{\bar{r}_f\} = \frac{1}{4} \prod_{i=1}^N (P_i \cdot C_i) \cdot \frac{1}{\hat{r}_i \cdot T_{upp}} = \frac{1}{4} \left(\prod_{i=1}^N \frac{C_i}{T_{upp}} \right) \cdot \frac{1}{T_{upp}} \quad (14)$$

由式(14)可见,在各区域的检测概率、搜索一次所需要的时间和总的目标强度一定且 $\hat{r}_i < 1$ 的情况下,搜索性能只与估计目标强度所需的时间长短有关.估计时间越长,搜索性能就越接近最优,即 $\lim_{T_{upp} \rightarrow \infty} E\{\bar{r}_f\} = 0$.

4 平稳目标环境下的自适应搜索性能

分区搜索^[10]为获取目标分布信息、自适应调度波束和算法自适应实现提供了可能性.自适应的分区搜索就是不断估计各区域的目标强度,不断根据获得的目标强度信息调节各区域的搜索帧周期来调度波束、调节雷达资源分配,逐渐使搜索性能接近最优,从而实现自适应搜索的过程.我们分析自适应搜索性能的指标有两个:收敛速度和稳态误差.

在分区搜索中,如果在每次帧周期调节后都希望能得到比以前更好的搜索性能,由第3节可知,就必须使当前的目标强度估计比以前更准确.如果每次调节帧周期仅仅利用当前调节周期所获得的目标数来估计搜索帧周期,显然,必须使每次调节帧周期之前估计目标数所需的时间,即调节周期 T_{upp} 越来越大,目标强度估计误差才能越来越小,搜索帧周期才能越来越准,搜索性能才能越来越好.但是,这样的自适应搜索收敛速度将非常慢.

在平稳目标环境中,我们在每次调节搜索帧周期时不但可以只利用当前调节周期内估计的目标数,还完全可以利用以前的目标数据,这样就可以在不增加调节周期 T_{upp} 的情况下使目标强度估计越来越准,使搜索性能越来越好了.我们可以通过各种滤波算法利用以前的目标数据来更加准确地估计目标强度.本文采用一种计算量很小的简单方法——滤波.

假设在搜索过程中 T_{upp} 不变,每个区域目标强度估计所使用的滤波器的参数相同,我们把搜索帧周期的调节次数用 k 表示,那么每次用滤波器估计的目标数为:

$$\hat{r}_i(k+1) = (1 - \alpha) \hat{r}_i(k) + \alpha \hat{r}_{iob}(k+1), i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

其中, $(0 \leq \alpha \leq 1)$ 为滤波参数, $\hat{r}_{iob}(k)$ 为第 k 次调节周期 T_{upp} 内估计到的目标强度, $\hat{r}_i(k)$ 为第 k 次经过滤波后的目标强度, $\hat{r}_i(0)$ 为最初根据先验信息获得的目标强度,没有先验信

息时,按照第 0 次均匀搜索所获得的目标强度估计.

当 $k=1$ 时,相当于每次计算搜索帧周期所利用的目标估计强度为当前一个调节周期 T_{upp} 内估计的目标强度.但是,在平稳目标环境中,因为各区域的目标强度是不变的,因此目标强度的最大似然估计就是把所有观测到的目标数取时间平均,这样在式(15)中最佳的滤波参数应该是时变的,即 $1/k$.当 $k=1/k$ 时,随着时间增大滤波器的参数不断减小,最后趋于 0,最后的搜索性能也趋于最优.这样,在每次滤波后的目标强度估计方差为:

$$\sigma_{iob}^2(k) = (1/k) \cdot \sigma_{iob}^2 = \sigma_{iob}^2 / (k \cdot T_{upp}) \quad i=1, 2, \dots, N, k=1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

其中, σ_{iob}^2 为式(6)计算的一个周期 T_{upp} 内得到的目标强度估计误差方差.

由式(6)、(16)和(12)可得每更新一次搜索帧周期后的搜索性能“失调”的均值为:

$$E\{\bar{u}_f(k)\} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N (P_i \cdot C_i) \cdot \frac{1}{i \cdot k \cdot T_{upp}} = \frac{1}{4} \left[\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{i} \right] \cdot \frac{1}{k \cdot T_{upp}} \quad (17)$$

区域号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ_i (架/分)	0.0792	0.0798	0.8988	0.5826	0.9312	0.2214	0.6834	0.2226	1.0464	1.2546
T_i (秒)	0.4506	2.4587	0.3515	0.3671	0.6198	3.2595	0.4510	0.3780	0.3322	1.3316
T_{si} (秒)	14.295	33.265	3.7478	4.7572	4.8893	22.995	4.8685	7.8095	3.3767	6.1741

从图 1 中可以看出:(1)分区搜索可以大大提高搜索性能,使目标被发现的平均时间缩短了近 40%;(2)自适应搜索性能随着搜索时间的增加,逐渐趋向最优;(3)在平稳目标环境下,保证一个搜索帧周期更新周期内大多数区域至

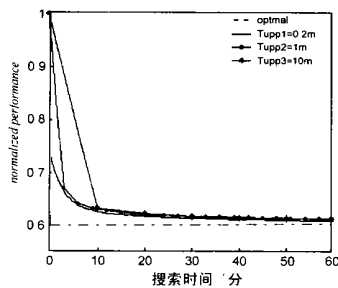


图 1 归一化搜索性能~搜索时间

少搜索一遍的基础上,更新周期 T_{upp} 越小自适应搜索收敛越快.

5 非平稳目标环境下搜索算法的自适应性能及最优参数

所谓非平稳目标分布环境就是目标强度在不断变化的雷达警戒环境.在非平稳环境中,由于目标强度是变化的,若目标估计时间太短或滤波参数太大,则由于利用的数据很少,造成的估计误差会很大;若估计时间太长或滤波参数太小,则由于环境变化产生的估计误差又会很大,因此帧周期调节周期和最优滤波参数都必须折衷选择.

同样假设在搜索过程中 T_{upp} 不变,搜索帧周期的调节次数用 k 表示,每个调节周期之间目标强度的变化为一阶马尔可夫过程,每个调节周期内的目标强度表示如下:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + T_{upp} \cdot \dot{\rho}_i, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (18)$$

其中, $\bar{u}_f(k)$ 表示第 k 次更新搜索帧周期后的搜索性能“失调”.

比较式(17)和式(14)可知,通过 $k=1/k$ 的滤波,使分区搜索的性能在 T_{upp} 保持不变的情况下,随着 k 的增大而快速收敛,最终接近最优.

例子:假设在平稳目标分布环境下,某相控阵雷达警戒空域中高强度袭击模式的目标强度为:6 架/分;相控阵雷达均匀搜索完一遍整个警戒空域的时间为 10 秒;把整个警戒空域分成 10 个区域,每个区域的目标强度、搜索一遍的时间和最优区域搜索帧周期如下表 1 所示.

图 1 为上述假设环境下的自适应搜索性能.其中,滤波器采用最优参数 $1/k$,各区域目标检测概率为 1, Monte-Carlo 实验次数为 100 次.横坐标为搜索时间(分),纵坐标为归一化的搜索性能,即自适应分区搜索的平均发现时间与均匀搜索的平均发现时间的比值.图中比较了不同更新周期 T_{upp} 下的自适应搜索性能以及最优的分区搜索性能,其中,当最初的更新周期内没有目标出现时,目标强度估计用 0.06 架/分代替.

其中,随机变量 $\dot{\rho}_i$ 表示目标强度变化速度,均值为零、方差为 $\sigma_{\dot{\rho}_i}^2$,且相互之间不相关.可见,时间 T_{upp} 越长目标强度变化越大.

这样,在有限时间内估计的目标强度误差由两部分组成,一部分是在有限时间内的“观测”误差,随估计时间增加而减小,如式(6)所示;另一部分是“机动”误差,就是由于非平稳目标分布环境变化造成的误差,随估计时间增加而增大;这两部分误差互不相关.这样式(13)又表示如下:

$$\hat{\rho}_i - \rho_i = \frac{\psi_{io} + \psi_{im}}{i}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (19)$$

其中, ψ_{io} 为“观测”误差,方差为 σ_{io}^2 / T_{upp} , ψ_{im} 为“机动”误差,方差为 $\sigma_{im}^2 \cdot T_{upp}^2$.

由式(6)、(19)和(12)得:

$$E\{\bar{u}_f\} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N (P_i \cdot C_i) \left[\frac{1}{i \cdot T_{upp}} + \frac{\sigma_{im}^2 \cdot T_{upp}^2}{i^2} \right] = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \left[\frac{C_i}{T_{upp}} + \frac{\sigma_{im}^2 \cdot T_{upp}^2}{i} \right] \quad (20)$$

把目标强度估计经过最优滤波^[11]后,稳态的最佳目标强度估计方差为:

$$\sigma_{iob}^2(k) = \sigma_{iob}^2 = \sigma_{iob}^2 / T_{upp}, \quad i=1, 2, \dots, N, k=1, 2, 3 \dots \quad (21)$$

其中, $\sigma_{iob}^2 (0 \leq i \leq 1)$ 为各区域的最优滤波参数,由“观测”方差、“机动”方差和 T_{upp} 共同决定^[11], σ_{iob}^2 为式(5)计算的一个周期 T_{upp} 内估计到的目标强度的误差方差.

由式(21),式(20)又表示如下:

$$E\{\bar{v}_{fit}\} = \frac{1}{4} \prod_{i=1}^N \left(\frac{C_i}{T_{upp}} + \frac{2 \cdot T_{upp}^2}{i} \right) \quad (22)$$

由式(20)、(22)可见:自适应搜索的性能“失调”由两部分组成,一部分由随 T_{upp} 增大而减小的“观测”误差造成,另一部分由随 T_{upp} 的增大而增大的目标强度“机动”造成;要想使总的失调最小, T_{upp} 不能太大,也不能太小,至少存在一个最优 T_{upp} 使“失调”最小;式(22)经过滤波后的“观测”误差有所减小,总的“失调”应该比式(20)小,但是无论如何,只要目标强度“机动”存在,总的失调就不可能消除,自适应搜索性能就不可能达到最优。

在式(22)中,由于各区域的最优滤波参数 i 也是 T_{upp} 的复杂函数^[11],要求 T_{upp} 最优值的解析解是非常困难的.使式(20)中 $E\{\bar{v}_f\}$ 最小的最优 T_{upp} 表示如下:

$$T_{uppopt} = \left(\frac{\prod_{i=1}^N C_i}{2 \cdot \prod_{i=1}^N (C_i \cdot 2^i) / i} \right)^{1/3} \quad (23)$$

把式(23)代入式(20)得到式(20)的最小值,即最小性能“失调”的均值为:

$$E\{\bar{v}_f\}_{\min} = \frac{3}{8} \cdot \left(\prod_{i=1}^N C_i \right)^{2/3} \left\{ 2 \cdot \prod_{i=1}^N (C_i \cdot 2^i) / i \right\}^{1/3} \quad (24)$$

由式(23)、(24)可见, T_{uppopt} 随目标强度“机动”方差增大而减小, $E\{\bar{v}_f\}_{\min}$ 随目标强度“机动”方差增大而增大,只要目标强度“机动”方差存在,“失调”就不可能为0,分区搜索就不可能达到最优.如果把目标强度估计经过最优滤波,则“失调”会有所减小,但也不可能达到0。

6 小结

本文主要研究了目标强度估计误差对最优分区搜索性能的影响,以及平稳目标分布环境和非平稳目标分布环境中的自适应分区搜索方法和性能.在平稳目标分布环境中,由于目标强度分布是不变的,因此可以把所有观测时间内出现的新目标数取平均来获得目标强度的极大似然估计,随着时间的增加,目标强度估计越来越准,分区搜索性能也逐渐趋于最优性能;在非平稳目标分布环境中,由于目标强度不断地变化,目标强度估计误差只能通过采用最优的滤波参数和调节周期达到某一个最小值,而不可能随时间增加任意减小,因此,自适应分区搜索性能与最优分区搜索之间始终存在“失调”,不能趋于最优分区搜索性能。

参考文献:

[1] Wulf D Wirth. Fast and Efficient Target Search with Phased Array Radar [C]. IEEE International Radar Conference, Apr 21 - 23, 1975: 198 - 203.

- [2] W Fleskes. On search Strategies of Phased Array Radars [C]. IEE Conference Publication International Conference-RADAR 82. 1982:12 - 14.
- [3] W Fleskes, G V Keuk. Adaptive Control and Tracking with the ELRA Array Radar experimental System [C]. IEEE International Radar Conference, Apr 28 - 30, 1980:8 - 13.
- [4] E C Posner. Optimal Search Procedure [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1966, 12(2): 157 - 160.
- [5] L D Stone. Theory of Optimal Search [M]. Academic Pres, New York, U. S., 1975.
- [6] H Donnemann. Search Strategies for Phased Array Radar [R]. Report No. 186, Forschungsinstitut für Funk und Mathematik D-5307 Wachtberg-Werthhoven, Germany, 1972.
- [7] E R Billam. Design and Performance Considerations in Modern Phased Array Radar [C]. IEE Conference Publication International Conference-RADAR 82. 1982:15 - 19.
- [8] E R Billam. Parameter Optimization in Phased Array Radar [C]. IEE Conference Publication International Conference-Radar 92, Oct 12 - 13, 1992:34 - 37.
- [9] 卢建雄. 相控阵雷达的优化搜索方法 [D]. 硕士论文, 1997.
- [10] 徐斌, 杨晨阳, 李少洪, 毛士艺. 相控阵雷达中的最优分区搜索算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(12): 69 - 73.
- [11] Kalata, Paul R. Tracking Index: a Generalized Parameter for Alpha minus Beta and Alpha minus Beta minus Gamma Target Trackers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Mar. 1984, 20(2): 174 - 182.

作者简介:



徐斌 男. 1974年9月出生于四川仁寿. 1998年于北京航空航天大学获学士学位, 现在在北京航空航天大学攻读博士学位. 研究兴趣包括: 相控阵雷达中的数据处理的, CDMA 移动通信中的先进信号处理.



杨晨阳 女. 1965年9月出生于浙江杭州. 北京航空航天大学电子工程系教授、博士, IEEE 会员. 主要研究领域为: 雷达与无线通信中的信号处理、阵列信号处理和数据处理等.