

特约稿

侯建(1965-),男,江苏南京人。研究员,硕士,长期从事防空导弹武器系统探测制导总体工作。参加了多个国家重点型号的研制,获得国防科学技术进步特等奖和一等奖各一项,部级科技进步一等奖和二等奖各一项,现为探测制导领域专业副总师,通用制导指令数据链技术方向副总技术负责人,技术首席,院级学术技术带头人。

## 关于雷达方程的讨论\*

侯建

(北京电子工程总体研究所,北京 100854)

**摘要:**微电子技术的快速发展使得固态有源相控阵天线在雷达中的应用日益普及,对于采用固态有源相控阵天线的雷达,如果为了降低旁瓣而进行加权,在使用雷达方程进行性能评估时必须考虑加权损失。针对这一问题进行了理论推导,并给出了加权损失的计算公式。

**关键词:**雷达;相控阵天线;固态有源相控阵天线;雷达方程

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2020.06.001

中图分类号:TN951;TJ76 文献标志码:A 文章编号:1009-086X(2020)-06-0001-04

## Discussion on Radar Equation

HOU Jian

(Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

**Abstract:** With the rapid development of microelectronics, the application of solid-state active phased array antenna in radar becomes more and more popular. For the radar with solid-state active phased array antenna, the weighting loss must be considered while using radar equation for performance evaluation if weighting is used to reduce side lobe. The theoretical derivation of this problem is carried out and the formula to calculate the weighting loss is derived.

**Key words:** radar; phased array antenna; solid state active phased array antenna; radar equation

## 0 引言

对于从事雷达系统总体设计以及探测制导总体设计的人员来讲,雷达方程是一个经常需要用到的工具,借助于雷达方程可以进行雷达威力估算、精度分析、抗干扰能力分析等等。但是随着新体制

雷达的出现,雷达方程在使用中有一些细节的问题需要注意,否则有可能会在分析问题影响结论的准确性。

## 1 雷达方程式简述<sup>[1-5]</sup>

为描述问题的方便,先对雷达方程作一个简要

\* 收稿日期:2020-08-18;修回日期:2020-09-03

基金项目:有

通信地址:100854 北京市142信箱30分箱

描述。

雷达方程的公式如下：

$$SNR = \frac{P_i \tau G_t G_r \lambda \sigma N^\gamma}{(4\pi)^3 R^4 k T F L} \quad (1)$$

式中：

$SNR$  为目标检测(跟踪)信噪比； $P_i$  为发射机输出功率(发射机输出端口的功率)； $\tau$  为发射信号脉冲宽度； $G_t$  为天线发射增益； $G_r$  为天线接收增益； $\lambda$  为雷达工作波长； $\sigma$  为目标的雷达散射截面积； $N$  为雷达波束驻留目标期间接收的回波脉冲个数； $\gamma$  为脉冲积累效率( $\gamma \leq 1$ )； $R$  为目标到雷达的距离； $k$  为玻尔兹曼常数； $T$  为标准温度(一般取 290 K)； $F$  为接收机噪声系数； $L$  为系统损耗。

当然对于不同的应用场景,雷达方程的具体显示可能会有所不同。

在系统损耗中通常用式(2)估算：

$$L = L_B + L_{SC} + L_t + L_r + L_f + L_{SC} + L_a + L_{qt} \quad (2)$$

式中： $L_B$  为天线波束形状损失,该项损失是考虑目标虽然在雷达天线波束中,但没有处在天线增益最大处而考虑的损失)； $L_{SC}$  为天线波束扫描损失,该项损失仅对采用相控阵天线的雷达适用,是考虑当相控阵天线波束扫描偏离法线时,天线增益下降引起的损失； $L_t$  为发射馈线损失,该项损失是考虑探测信号从发射机输出端口传输到天线口面的信号传输损失)； $L_r$  为接收馈线损失,该项损失是考虑目标回波信号从天线口面传输到接收机输入端口的信号传输损失)； $L_f$  为滤波器失配损失,该项损失是考虑雷达接收机的频率特性与探测信号的频谱不匹配(或者说与探测信号理想的匹配滤波器频率特性不一致)引起的信噪比损失； $L_{SC}$  为信号处理损失,该项损失是考虑雷达信号处理可能引入的信噪比损失(如在目标探测阶段一般需要考虑目标回波信号跨距离波门或多普勒波门会引起损失)； $L_a$  为大气传输损失,该项损失是考虑探测信号以及雷达回波信号在雷达天线到目标之间传输时,由于大气的吸收所引起的传输损失(如果需要可能还要考虑雨雪云雾引起的损失)； $L_{qt}$  为其他因素引起的损失,该项损失是考虑除上述各项因素外其他因素引起的信噪比损失。

有的时候还会出现脉冲积累损失,实际上在公

式(1)中的  $N^\gamma$  就已经表达了脉冲积累损失,脉冲积累损失为

$$L_{PA} = 10(1 - \gamma) \lg(N) \quad (3)$$

当脉冲积累效率  $\gamma = 1$  时脉冲积累损失为 0 dB (即没有脉冲积累损失)。如果在雷达方程中的系统损耗中包含了脉冲积累损失  $L_{PA}$ ,则在雷达方程的分子上  $N^\gamma$  就应该换为  $N$ 。

## 2 雷达方程在新体制雷达中应用需要考虑的细节问题

随着电子技术的发展,固态有源相控阵天线技术已经日益成熟,获得了越来越广泛的应用。另一方面,随着电磁环境的日益复杂,对雷达天线的旁瓣电平要求也越来越高(提出了低至 -30 dB 甚至 -40 dB 以上的要求),为了实现要求的低旁瓣,采用各种窗函数进行加权是一个重要的技术途径。但对于采用固态有源相控阵天线的雷达,如果使用加窗技术进行天线的低旁瓣设计,那么在使用雷达方程进行性能分析时,有一些细节问题需要特别注意,否则会影响结论的准确性。

先回顾一下采用非固态有源相控阵天线的雷达,其发射的大功率射频探测信号是由一个集中式的发射机产生,经过馈电网络馈送到天线各辐射单元后经过移相器移相后向空间辐射。当需要采用窗函数进行加权时,通过合理地设计馈电网络,将由发射机送来的探测信号功率按照加权函数的要求在各天线辐射单元之间进行分配,因此由发射机送来的信号功率全部辐射出去了,没有功率损失(当然馈电网络存在插入损耗,该损耗在雷达方程中已经计算在发射馈线损失  $L_t$  中了)。

现在来讨论采用固态有源相控阵天线的雷达。其发射的大功率射频探测信号不是由一个集中式的发射机产生的,而是由天线口面上的各个辐射单元产生的,这些天线单元在雷达发射探测信号时完成发射信号的产生、移相和辐射(各单元辐射的探测信号在空间合成),在雷达接收信号时完成信号的接收、移相、低噪声放大(高放),有的甚至可以做到变频、中放和中频采样。可见这些天线单元既完成信号的发射也完成信号的接收,因此通常称为 TR 模块。图 1 和图 2 给出了固态有源相控阵天线和 TR 模块的原理示意图。

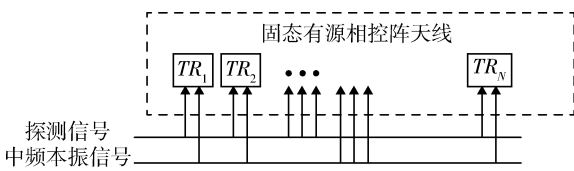
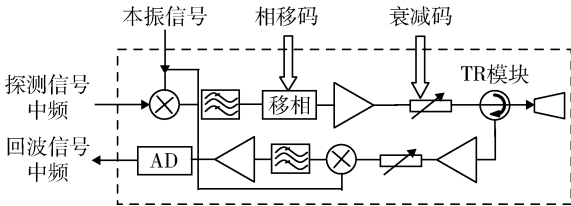
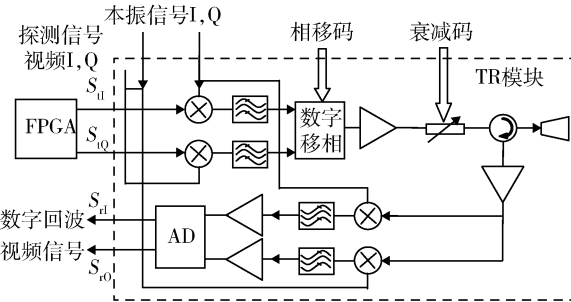


图1 固态有源相控阵天线原理示意图

Fig.1 Sketch map of schematic diagram of solid state active phased array antenna



a) 采用常规移相器的TR模块



b) 采用数字移相技术的可用于DBF的TR模块

图2 TR模块原理示意图

Fig.2 Sketch map of schematic diagram of TR module

为了充分利用 TR 模块的输出功率,通常 TR 模块都工作在饱和功率状态或接近饱和功率状态。也就是说 TR 模块的功率在工作过程中是近似不变的。因此对于采用固态有源相控阵天线的雷达,雷达方程中的发射机功率应按式(4)计算:

$$P_t = NP_1, \quad (4)$$

式中: $P_t$  为雷达方程中的发射功率; $P_1$  为 TR 模块的输出功率; $N$  为天线阵面上 TR 模块的数量。

当需要采用窗函数进行加权时,就需要对各 TR 模块的输出信号按照加权函数的要求进行幅度衰减,因此各 TR 模块所产生的信号功率并没有全部辐射出去,有相当一部分功率是由于加权而衰减掉了,因此辐射信号有功率损失(当然从 TR 模块输出口到辐射器之间的传输线的插入损耗,在雷达方程中仍然计算在发射馈线损失  $L_1$  中,但这个发射馈线损失  $L_1$  并不包含由于窗函数加权而带来的衰

减,因此还要计算由于加权而带来的信号功率损失)。同样,在目标回波信号的接收过程中,由于加权的原因,目标回波信号的功率也是有损失的,如果发射和接收采用的加权函数相同,则接收的回波信号功率加权损失与发射信号的功率加权损失相同。

特别需要说明的是:可能有的人会认为,由于窗函数加权,导致天线主瓣变宽,增益下降,这就已经体现了功率衰减,这是不对的。由于窗函数加权,导致天线主瓣变宽,增益下降这是窗函数加权的另一个效应;而由于窗函数加权,导致信号衰减,功率没有全部辐射出去,这是窗函数加权的另一个效应。

可以这样理解:天线相当于辐射信号的功率分配器,它只改变辐射源辐射功率在空间的分布,并不增加也不减少辐射源辐射的信号功率,也就是说如果不考虑天线的损耗,那么天线将会把馈送给它的信号功率全部辐射到空间中去。假定有一个辐射源,其输出功率为  $P_t$ ,如果没有天线,该辐射源将各项同性地向空间辐射信号,在距离辐射源  $R$  的地方,辐射信号的功率密度为

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2}.$$

如果将该辐射源接到一个增益为  $G_t$  的天线,则该天线将会把辐射源馈送给它的辐射信号的功率全部辐射到空间中去,只是对辐射信号的功率在空间进行了分配,在天线方向图的最大值方向,辐射信号的功率密度为

$$S' = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}.$$

如果用一个将辐射天线完全罩住的接收天线(比如在距离辐射天线  $R$  处用一个面积为  $4\pi R^2$  的球面天线)进行接收,则其所接受的信号总功率也一定为  $P_t$ 。

对于固态有源相控阵天线的每一个辐射单元,假定其输出功率为  $P_1$ ,由于在进行窗函数加权时,对辐射单元的辐射信号进行了衰减(乘以一个不大于 1 的加权系数),因此其辐射到空间中的功率就成为  $w_i^2 P_1$  ( $w_i$  为该辐射单元的加权系数)。如果此时用一个将辐射单元完全罩住的接收天线(比如在距离辐射天线  $R$  处用一个面积为  $4\pi R^2$  的球面天

线)进行接收,则所接受的信号总功率就成为  $w_i^2 P_1$ , 而不再是  $P_1$ , 这个差别就是加权损失。除此之外, 如果各辐射单元所合成的相控阵天线的增益为  $G_i$  (注意由于加权, 导致天线的主瓣变宽, 增益相对于没有加权时已经降低, 这里的  $G_i$  已经考虑了由于加权导致的增益下降), 因此在天线方向图的最大值方向, 辐射信号的功率密度为

$$P = \frac{\left(\sum_{i=1}^N w_i^2\right) P_1 G_i}{4\pi R^2}.$$

可见: 对于采用固态有源相控阵天线的雷达, 在用雷达方程进行性能分析时, 仅考虑加权引起的天线增益下降是不够的, 还需要增加一个由于加权引起的信号功率损失, 这个损失就是加权损失  $L_w$ 。

综上所述, 采用窗函数加权可以大幅度地降低天线的旁瓣电平, 但对雷达性能也会产生一些负面影响, 主要体现在 2 个方面:

(1) 由于窗函数加权, 将导致天线波束展宽, 这一方面导致对目标的角度分辨力降低, 另一方面导致天线增益下降, 最终使接收的目标回波信号能量 (相对于不加权时) 产生损失, 这一损失体现在加权后天线增益的下降;

(2) 对于采用固态有源相控阵天线的雷达, 由于窗函数加权, 发射信号和接收信号的能量都有损失, 这一损失就是本文所说的加权损失。

需要说明一点: 对于采用固态有源相控阵天线的雷达, 为了克服加权损失, 可以采用具有多种不同输出功率的 TR 模块来实现窗函数加权, 对于这样的雷达, 发射就不用考虑加权损失了 (接收还需要考虑加权损失), 但这样做的缺点是需要根据所选择的加权函数研制多种输出功率的 TR 模块, 增加了系统的复杂性, 研制成本也会增加, 并且不能灵活地改变加权函数。另外, 由于各模块的输出功率不同, 雷达天线口面的输出功率相比于整个阵面只采用一种输出功率的 TR 模块的天线也是要降低的, 所不同的是前者天线本身所产生的总功率减小了, 因而整个天线的功耗减少了, 对于天线的热设计是有利的; 而后者天线本身所产生的总功率并没有减小, 而是由于加权的缘故被衰减了一部分, 因而整个天线的功耗并没有减少, 对于天线的热设计

没有任何贡献。

### 3 加权损失的计算

下面讨论如何计算加权损失。

加权损失定义为信号不加权时的功率与加权后的功率之比。

假设天线有  $N$  个单元, 在不加权时, 各单元是等幅的, 即各单元的信号幅度为  $A$ , 如果加权函数为  $w_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ), 则加权后各单元的信号幅度为  $Aw_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ), 因此加权前后的信号功率分别为

$$P = \sum_{k=1}^N A^2 = NA^2, \quad (5)$$

$$P_w = \sum_{k=1}^N (w_n A)^2 = A^2 \sum_{k=1}^N w_n^2. \quad (6)$$

所以, 加权损失为

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_w} = 10 \lg \frac{N}{\sum_{n=1}^N w_n^2}. \quad (7)$$

### 4 结束语

固态有源相控阵天线技术已经日益成熟, 在雷达中获得了越来越广泛的应用。笔者在进行某个项目的论证时就采用了固态有源相控阵天线。在进行系统性能分析论证时, 发现以往技术报告和文献在使用雷达方程时没有加权损失这一项, 查阅了相关资料后也发现大多没有明确列入加权损失, 可能的原因是固态有源相控阵天线是最近才开始普遍使用的, 而以往的技术报告和文献使用雷达方程时不是针对固态有源相控阵天线, 因此, 笔者写了这篇文章, 希望引起同行特别是年轻设计师的注意。

#### 参考文献:

- [1] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1984.  
DING Lu-fei. Radar Principles [M]. Xi'an: Northwestern Institute of Telecommunications Engineering Press, 1984.
- [2] Merrill I. Skolnik. 雷达手册[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
Merrill I Skolnik. Radar Handbook [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

(下转第 38 页)