国防科技大学学报
JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY
一九八五年第四期　总第五十二期　No. 4 1985 Sum. 52

运动目标的射频模拟原理

刘　克　成

摘　要　目标的运动可以用一个天线阵模拟。本文推导出模拟的基本公式并给出一些模拟结果，也讨论了阵的设计原则。

一、引　言

为了鉴定飞行器上微波寻的系统（即导引头）的性能，需要进行测试。近年来，这种测试可以在专门设计的微波暗室实施，其优点主要是：1)具有全天候性；2)比外場测试大大节省了经费；3)由于信号可控，也提高了测试的精度，数据重复性好。在微波暗室内，通常采用一个有源的天线阵面（可以是平面阵，也可以是曲面阵）模拟目标。给阵面上一个元馈电，而其它元不工作时，处于接收状态的导引头雷达将跟踪这个元。顺序给阵面的元馈电造成有源元的移动，就能模拟目标的运动。因为阵面上元的位置是离散的，因此要模拟目标的連续运动，需要同时给相邻的几个元馈电，可以称之为一个元组（通常包含3～4个元）。控制元组的馈电幅度相位和变换速度（通常用计算机控制），可以模拟信号的角闪烁和目标的运动参数。这就是用面阵模拟目标运动的原理。

图 1 给出测试设备的原理图，阵面用衰减器和移相器控制阵元的幅度和相位，而用开关器件控制元组的接通。

目前射频模拟设备通常有几组阵元同时工作。以模拟从不同方向进入的多个目标，并且还有干扰阵列，模拟敌方同时施放的干扰，因此这个环境是相当逼真的。

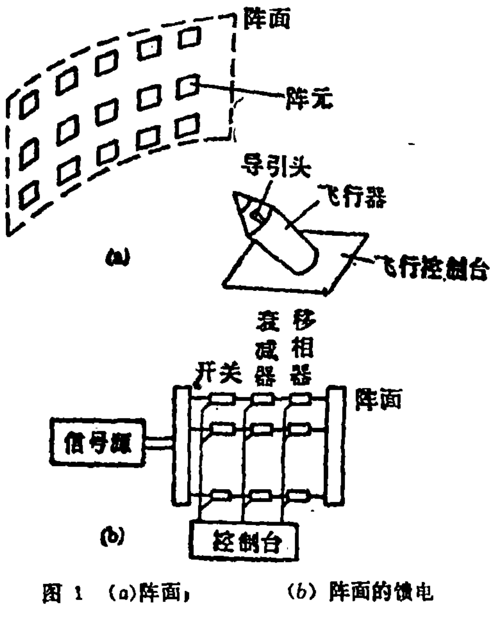

图 1　(a)阵面，　(b) 阵面的馈电

这种模拟设备的概念是简单的，国外已经应用，所用设备也有详细的报导［1］，但是缺少具体的计算公式。为此，本文将导出阵面模拟的基本公式，并对阵面设计原则作

一九八五年元月五日

简要的讨论。

二、目标运动模拟的基本公式

首先讨论最简单的二元阵情况，并假设阵元是点源。此处采用直角坐标系，并且不作远区假设，以使公式适用于中间区，其优点是显然的：在同样的跟踪扇形角内，阵面可以缩小，可以降低微波暗室的造价。

如图2所示的点源阵，馈电电流分别为$I_1e^{-j\varphi_1}$和$I_2e^{-j\varphi_2}$，二元相距为$2d$，则在xz平面内的观察点$P(x,z)$处的合成場为

$$
\begin{aligned}
E &= A_1e^{-j(kr_1+\varphi_1)}+A_2e^{-j(kr_2+\varphi_2)} \\
&= A_1e^{-j(k\sqrt{(x+d)^2+z^2}+\varphi_1)}+A_2e^{-j(k\sqrt{(x-d)^2+z^2}+\varphi_2)} \\
&= f_1(x,z)-jf_2(x,z) \qquad (1)
\end{aligned}
$$

式中
$$
\begin{aligned}
f_1(x,z) &= A_1\cos(k\sqrt{(x+d)^2+z^2}+\varphi_1) \\
&\quad +A_2\cos(k\sqrt{(x-d)^2+z^2}+\varphi_2) \\
f_2(x,z) &= A_1\sin(k\sqrt{(x+d)^2+z^2}+\varphi_1) \\
&\quad +A_2\sin(k\sqrt{(x-d)^2+z^2}+\varphi_2) \qquad (2b)
\end{aligned}
$$

$$A_1=\frac{CI_1}{r_1},\ A_2=\frac{CI_2}{r_2},$$

C为决定于元形式的常数。

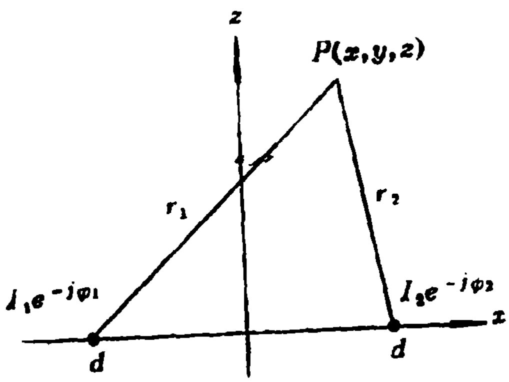

图2 二元阵的合成場

对于单脉冲导引头，它位于P点时，跟踪的是该处射线的方向，而射线是与P点处等相线垂直的，射线的方向即为相位梯度的方向。因此，只要求出空间合成場的相位，就能求出跟踪方向。

由(1)式可求出合成場的幅度、相位分别为

$$|E|=[f_1^2(x,z)+f_2^2(x,z)]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

$$\xi(x,z)=\tan^{-1}[-f_2(x,z)/f_1(x,z)] \qquad (4)$$

由于ξ是常数时（即等相线），$\tan\xi$也是常数，故梯度可对$\tan\xi$进行，而不改变射线的方向。即令

$$T(x,z)=\tan\xi(x,z)=-f_2(x,z)/f_1(x,z)$$

$$\nabla T(x,z)=\hat{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(-\frac{f_2}{f_1}\right)+\hat{z}\frac{\partial}{\partial z}\left(-\frac{f_2}{f_1}\right) \qquad (5)$$

通常导引头位于z轴上，设其位置为$(0,r_0)$，此时

$$
\begin{aligned}
\nabla T(0,r_0)=\hat{x}\Bigg\{&\frac{kd[-A_1\cos(k\sqrt{d^2+r_0^2}+\varphi_1)+A_2\cos(k\sqrt{d^2+r_0^2}+\varphi_2)]}{\sqrt{d^2+r_0^2}f_1(0,r_0)} \\
&-\frac{kd[A_1\sin(k\sqrt{d^2+r_0^2}+\varphi_1)-A_2\sin(k\sqrt{d^2+r_0{}^2}+\varphi_2)]f_2(0,r_0)}{\sqrt{d^2+r_0^2}f_1^2(0,r_0)}\Bigg\}
\end{aligned}
$$

$$-\hat{y}\left\{\frac{kr_0}{\sqrt{d^2+r_0^2}}\left[1+\frac{f_2^2(0,r_0)}{f_1^2(0,r_0)}\right]\right\} \tag{5}$$

模拟目标在空间的二維运动时，可以在xy平面上放置排成等边三角形的三个元或排成正方形的四个元构成元组。

如图3所示，设各元电流为 $I_n e^{-j\varphi_n}$，则在 $P(x,y,z)$ 点总場为

$$E=\sum_{n=1}^{N} A_n e^{-j(\varphi_n+kr_n)}$$

$$=f_1(x,y,z)-jf_2(x,y,z) \tag{6}$$

$$f_1(x,y,z)=\sum_{n=1}^{N} A_n\cos(kr_n+\varphi_n) \tag{7a}$$

$$f_2(x,y,z)=\sum_{n=1}^{N} A_n\sin(kr_n+\varphi_n) \tag{7b}$$

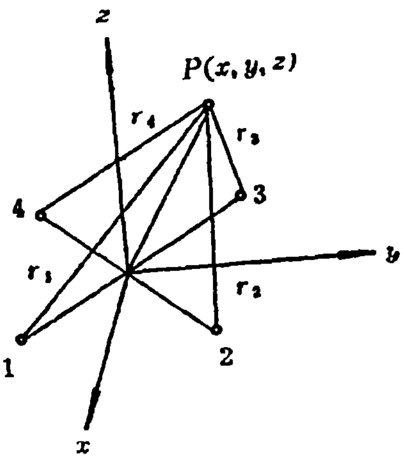

图 3 目标运动二维模拟

A_n、r_n 的意义如前。$N=3$ 或 4 。

$$\nabla T(x,y,z)$$

$$=-\left(\hat{x}\frac{\partial}{\partial x}+\hat{y}\frac{\partial}{\partial y}+\hat{z}\frac{\partial}{\partial z}\right)\frac{f_2(x,y,z)}{f_1(x,y,z)} \tag{8}$$

从(8)式就可求出模拟目标的位置 (x_0,y_0)

$$x_0=r_0\frac{\partial}{\partial x}\frac{f_1(x,y,r_0)}{f_1(x,y,r_0)}\Big/\frac{\partial}{\partial z}\frac{f_2(x,y,r_0)}{f_1(x,y,r_0)} \tag{9a}$$

$$y_0=r_0\frac{\partial}{\partial y}\frac{f_2(x,y,r_0)}{f_1(x,y,r_0)}\Big/\frac{\partial}{\partial z}\frac{f_2(x,y,r_0)}{f_1(x,y,r_0)} \tag{9b}$$

三、幅相控制的讨论

首先看幅度控制的影响。仍以二元阵为例，由(5)式不难看出，当 $I_2=0$ 时

$$\nabla T(0,r_0)=\hat{x}f_1(0,r_0)+\hat{z}f_2(0,r_0)$$

两分量的比值为

$$\frac{f_1(0,r_0)}{f_2(0,r_0)}=\frac{d}{r_0} \tag{10}$$

这就是通过 $P(0,r_0)$ 点射线的斜率，显然射线与辐射元到 $P(0,r_0)$ 的連线重合，因此模拟的目标确系在该辐射元处。

当 $I_1=I_2$，$\varphi_1=\varphi_2$ 时，由式(5)可见，$\nabla T(0,r_0)$ 仅有 $\hat{y}$ 分量，即模拟目标位置在坐标原点方向上。这和等幅同相二元阵相位中心的概念是一致的。但是这里不需要引进相位中心的概念，在任意的幅度相位值时，引进相位中心概念反而使问题复杂化。由上述二例可见，在二元同相时，控制幅度比值，模拟目标将在二元之间移动，不超出元的端线，这个结论可以推测是适用于二維阵的。

至于相位的影响则有不同的情景。首先可注意到在二元阵时，若仅一个元馈电，则另一个元无论采用何种相位值均不会改变射线的方向，即是说，相位是依附于激励幅度起作

用的。因此可以推测，当两个元幅度接近时，相位的变化将有最大的影响。现给出按(5)式计算的一个例子。取 $d=\lambda/2$，$r_0=3\lambda$，令 $A=A_2/A_1$，$\varDelta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$，用 x_0 表示模拟目标的位置，算出的结果见图 4。由图可见，除了 $A=0$ 和 1 外，$\varDelta\varphi$ 从 0 增加到 π，模拟目标的偏离单调增大，可以显著地偏离出二元阵的端线之外（即 $|x_0/d|>1$），这是

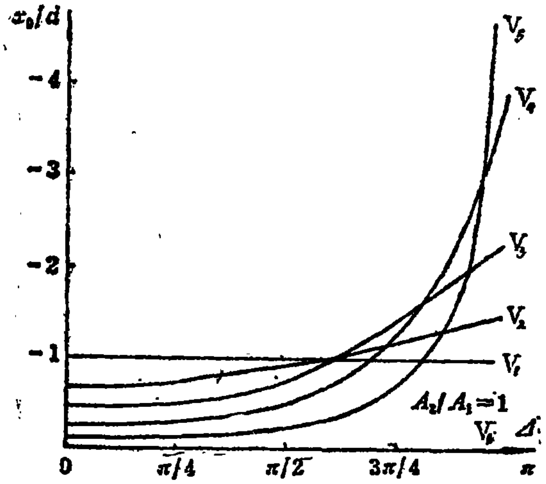

图 4 二元阵模拟目标位置($d=\lambda/2$ $r_0=3\lambda$) 曲线 V_1、V_2、V_3、V_4 V_5、V_6 分别为 $A_2/A_1=0,0.2,0.4,0.5,0.8,1.0$ 的情形。

一个有趣的现象。当相位差 $\varDelta\varphi$ 保持不变，而改变 A_2/A_1 时，则随 A_2/A_1 的增大，x_0/d 的变化不一定是单调的，在 $\varDelta\varphi>\pi/2$ 时，可能出现反转的现象。引人注目的是 $A_2/A_1\to1$ 的情况，它在 $\varDelta\varphi$ 的大部分区域内，曲线表现平直并且靠近横轴（即 $x_0/d\sim0$）。但在 $\varDelta\varphi$ 接近 π 时，曲线急剧上升，然而当 $A_2/A_1=1$，$\varDelta\varphi=\pi$ 的极限情况下，$x_0/d=0$。实际上这是一个奇异点。因为在此情况下，z 轴合成場是零場。

四、阵面的设计原则

模拟目标阵面的工作和一般的天线阵或相控阵是不同的，它不是全部元同时工作，而是在同一瞬时只有少数元工作。因此，设计原则与通常阵列应有所区别。例如一般阵列中讨论的栅瓣问题，在此处不需要考虑，从而可加大元间距离，所用元数可大大减少。

阵面的形式可以是平面阵或球面阵，由于阵面对于导引头要构成一个约 40° 角度，称为视場角，以检验导引头的角跟踪能力。故以导引头为球心的球面阵较好。这是由于1）各阵元安装都是向心的，因此照射导引头时方向性都一致；2）各阵元到导引头距离一致，不需要计算因距离衰减而引入的校正因子。

阵元的排列方式可以是正方形和等边三角形。事实上，模拟二維运动只需排成三角形的三个元，馈电控制相对简单些。只是计算目标轨迹的处理上较正方形要复杂些。在球面阵列时由于几何图形的原因也应该用三角形排列的阵。

阵元可以采用方向性较尖锐的元，以减小阵的输入功率。但是应保证在导引头口径

上有均匀的照射。例如可以采用下列设计准则：导引头口径对阵元的夹角不超过阵元方向图的0.8功率宽度。当飞行器的转动轴与口径不一致时，要求更严一些。

即
$$k_1\frac{\lambda}{a}>\frac{D}{r_0} \tag{11}$$

式中　a为阵元直径，D为导引头口径直径，k_1为系数，$k_1\approx0.5\sim0.7$（视阵元口径場分布而异）。

阵元的间距$2d$，同样应保证导引头对阵元的视角小于导引头的0.8功率宽度。即

$$k_2\frac{\lambda}{D}>\frac{2d}{r_0} \tag{12}$$

k_2的意义同前，对不同的天线应取不同的值。不难发现，式(11)和(12)是相容的，它们有相同的形式。

这里应该注意的是，这种设计原则较适用于阵元幅度控制的情况，即模拟目标不超出元组的端线。当用相位控制（特别是相位差接近π）时，导引头的主波束可能不对着元组。此时情况较复杂，需要另行研究。

参考文献

[1] AD A065728, Radio frequency simulation System (RFSS) capabilities summary, Mar. 15, 1979.

The principle of Radio Frequency Simulation System for Moving Targets Features

Liu Kecheng