

针对时空统计特性的箔条云半实物射频仿真

唐 波¹, 鲁嘉淇¹, 郭琨毅², 盛新庆²

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083;

2. 北京理工大学集成电路与电子学院射频技术与软件研究所, 北京 100081)

摘 要: 本文针对箔条云半实物射频仿真(Radio Frequency Simulation System, RFSS)中的关键问题进行研究, 给出了对箔条云进行半实物射频仿真时的三元组的馈电系数的计算公式. 与对点目标的仿真不同, 对箔条云的仿真更注重其散射场统计特性的复现. 箔条云的空间随机分布和随机运动特性, 表现为其回波的空间相关性和时间相关性. 本文通过三元组馈电系数之间的相关性来仿真箔条云散射回波的空间相关性; 通过差分重心公式的横向平移、径向相移以及时域滤波来仿真箔条云散射回波的时间相关性. 数值模拟结果验证了所给出的箔条云射频仿真方法的有效性. 这些工作为箔条云的半实物射频仿真提供了理论基础和分析框架.

关键词: 射频仿真; 箔条云; 三元组

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)04-0843-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211282

Reproducing of the Spatiotemporal Statistical Characteristics in RFSS for Chaff Clouds

TANG Bo¹, LU Jia-qi¹, GUO Kun-yi², SHENG Xin-qing²

(1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute for Radio Frequency Technology and Software, School of Integrated Circuit and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper studies the problems in the radio frequency simulation system (RFSS) for chaff clouds, and gives the method to calculate the feeding coefficients of the triad in RFSS. Compared with the point target simulation, chaff clouds simulation focuses on the reproducing of the statistical characteristics of echoes of chaff clouds. The random distribution and the random motion of the dipoles in the chaff clouds will cause the spatial correlations and the temporal correlations of the back scattering wave of the chaff clouds. In this paper, it is shown that the characteristics of the spatial correlations can be reproduced through the correlations among the feeding coefficients of the transmitting units. And the characteristics of the temporal correlations can be reproduced through the difference mass-center equation, phase shifting in the range and filtering in the time domain. The numerical results have been given to validate the calculating method of the feeding coefficients of the triad in RFSS for chaff clouds simulation. This work provides the analysis framework of the RFSS for chaff clouds theoretically.

Key words: RFSS (Radio Frequency Simulation System); chaff clouds; triad

1 引言

箔条干扰作为一种有效的无源干扰手段, 在电子对抗领域中占有重要的一席之地. 箔条干扰最早可以追溯到在二战时期的防空作战中的使用^[1]. 现代的战斗机和战舰, 仍保有使用箔条进行无源干扰的自卫手段. 箔条结构为线状, 材料通常为镀铝玻璃丝等^[2]. 其长度约为半个雷达工作波长. 箔条的优点在于可以大量生

产使用, 且质量较轻便于携带. 大量的箔条在空中形成箔条云, 从而形成巨大的雷达后向散射截面(Radar Cross Section, RCS), 对己方目标形成掩护. 因此, 对箔条云的研究和仿真具有现实意义, 一直获得很大关注. 现有文献对箔条云散射特性的研究主要集中在 RCS 的计算、散射回波空间相关性分析、散射回波功率谱的分析以及在雷达干扰对抗中的应用等方面^[3-5]. 而如何将

得较少.

半实物射频仿真是研发单位在进行雷达导引头系统研发过程中的一项重要的实验室内试验环节^[6]. 通过在微波暗室中模拟真实目标的散射回波, 测试雷达导引头在接收到这些回波时的反应. 半实物射频仿真系统主要由天线阵列墙、测试转台以及计算机控制系统等组成^[7]. 天线阵列墙上整齐排列着众多单元辐射天线, 相邻的三个单元天线可以构成一个三元组. 当这三个单元同时馈电时, 其在空中形成的辐射场相互叠加, 产生角闪烁效应, 导致转台处总辐射场的能流方向与待仿真点目标的能流方向相同, 从而实现点目标散射回波的仿真. 现有文献中关于半实物射频仿真的研究主要集中在仿真误差、近场效应等方面^[8-10]. 随着雷达导引头所面对的电磁环境越来越复杂, 在复杂电磁环境下测试雷达导引头成为发展趋势. 复杂的电磁环境中包括了箔条云干扰. 现有的半实物射频仿真针对箔条云干扰的仿真方法通常是令天线阵列墙上的其中一幅天线辐射箔条云散射信号. 这样的仿真方法虽然可以仿真出箔条云的 RCS 的影响, 甚至是回波功率谱的影响, 但是这样的处理方法未能完整复现箔条云散射回波的空间相关性和横向时间变化特性. 为了完整复现箔条云散射回波的空间相关性和时间相关性, 就不能在仿真中将箔条云视作一个点, 而应视作一个随机分布目标. 而当将箔条云视作随机分布目标进行仿真时, 其三元组单元馈电系数的计算方法就需要做进一步研究. 此外, 现有的关于多散射中心的射频仿真方法^[11], 由于箔条云中箔条数目巨大且具有随机性, 也不能直接应用到箔条云仿真.

箔条云的仿真与传统的点目标的仿真存在很大的不同, 其差异性和困难性主要表现在: 箔条云作为一种具有大量随机取向的箔条的组合物, 其箔条在空间的随机分布所导致的空间相关性需要三元组馈电系数的统计特性来体现; 同时, 箔条云散射回波的时间相关性, 也需要三元组馈电系数的时间相关性来体现. 因此, 本文将研究如何在半实物射频仿真中利用天线阵列墙上多个三元组的辐射来最大程度逼真地仿真箔条云的散射回波, 以实现箔条云回波的空间相关性和时间相关性在实验室中的仿真复现.

2 数学坐标系的设立

以导引头口径面中心位置为坐标原点, 以待计算馈电系数的三元组的中心点方向为 z 轴, 过原点与三元组一边平行的方向为 x 轴. 建立如图 1 所示的坐标系. 三元组单元的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i=1, 2, 3$, 目标的坐标为 (x, y, z) . 图 1 中的 ψ_x 由式(1)定义, ψ_{x_i} 则由式(2)定义.

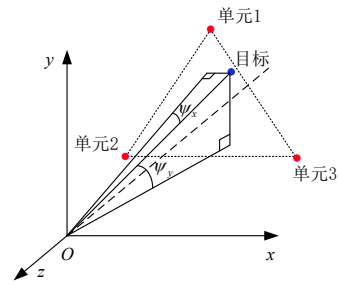


图 1 仿真坐标系设置

$$\psi_x = \arcsin \frac{x}{R} \quad (1)$$

$$\psi_{x_i} = \arcsin \frac{x_i}{R_i} \quad (2)$$

ψ_y, ψ_{y_i} 的定义方式与此相同. 其中, R, R_i 分别为目标和第 i 个单元到原点 O 的距离. 则目标的方位可以用 (ψ_x, ψ_y) 来表示, 第 i 个单元的方位可以用 (ψ_{x_i}, ψ_{y_i}) 来表示.

由半实物射频仿真的幅度重心公式, 可知

$$\psi_x = \sum_{i=1}^3 C_i \psi_{x_i} \quad (3)$$

$$\psi_y = \sum_{i=1}^3 C_i \psi_{y_i} \quad (4)$$

其中, C_i 为第 i 个单元的馈电系数, 其正比于馈电电压幅度.

本文的分析基于幅度重心公式, 且在分析中已令各单元到转台的延时相位进行相位配平. 重心公式对于点目标仿真和箔条云仿真在使用上具有不同的考虑. 在对点目标进行仿真时, 重心公式所导致的三元组近场误差需要与所要仿真的点目标方位角精度进行比较考虑; 而对箔条云进行仿真时, 作为大面积随机分布箔条的干扰回波, 其仿真角度要求一般不需要那么高, 通常仿真角度误差远小于仿真角度本身或均方差就可以了. 事实上, 箔条云散射回波的统计特性的复现对于导引头的仿真更有意义. 因此, 本文使用幅度重心公式进行解析分析.

3 空间相关性复现

箔条云在空间中呈立体分布, 而非一个点源. 因此, 对其进行半实物射频仿真需要能够复现该空间特性. 首先将箔条云进行层-角-角划分. 即, 首先对箔条云进行距离向划分, 基于这样的划分只需对每个距离门上的箔条云进行相同的仿真流程再在时序上叠加即可. 然后每个距离门上的箔条云依据投影到不同的三元组内部对其进行方位向的划分, 形成数个方位向子区域——即角-角划分是基于三元组视线方向. 注意, 此处的角角划分与通常的基于方位向分辨率的划分不

同. 然后确定每个层-角-角子区域内箔条的数量. 则可计算在子区域内箔条位置、取向皆为随机分布的箔条云的半实物射频仿真其三元组馈电系数的协方差矩阵和联合概率密度分布函数.

考察箔条云处于某个距离门、某个三元组内的部分. 对于三元组的某个单元, 其馈电系数应该由三元组内所有箔条的仿真馈电系数的叠加. 如前所述, 由重心公式, 第 h 根箔条对应的辐射单元 1 的馈电系数可以表示为

$$C_1^{(h)} = \frac{2}{3\sqrt{3}\psi_s^2} \left[\psi_x^{(h)}(\psi_{y_2} - \psi_{y_3}) + \psi_y^{(h)}(\psi_{x_3} - \psi_{x_2}) + (\psi_{x_2}\psi_{y_3} - \psi_{x_3}\psi_{y_2}) \right] \quad (5)$$

其中, ψ_s 为三元组外接圆半径张角, 即在转台处观察, 从三元组中心点到各单元的张角. 对于 $C_2^{(h)}$ 、 $C_3^{(h)}$ 只要将上式中的下标 1、2、3 轮换即可. 则对于该三元组内的所有箔条, 其馈电系数为

$$C_i = \sum_{h=1}^{N_c} \sigma_h C_i^{(h)}, i=1, 2, 3 \quad (6)$$

其中, σ_h 为复随机变量, 记 $\sigma_h = \gamma_h \exp(j\beta_h)$, β_h 满足均匀分布, $|\sigma_h|^2 = \gamma_h^2$ 为第 h 根箔条的 RCS. N_c 为三元组内的箔条数目. 则根据中心极限定理, C_1 、 C_2 、 C_3 应该满足复高斯分布.

记 $C_1 = u_1 + jv_1$, $C_2 = u_2 + jv_2$, $C_3 = u_3 + jv_3$, u_i 、 v_i ($i=1, 2, 3$) 皆为实数. 将 $(\psi_x^{(h)}, \psi_y^{(h)})$ 在三元组内的分布视作均匀随机分布, 且不同箔条的位置、姿态相互独立. 则

$$\begin{aligned} E(u_1 u_2) &= \frac{4}{27\psi_s^4} \sum_{h=1}^{N_c} E(\gamma_h^2 \sin^2 \beta_h) \\ &\quad \times E \left\{ \left[x^{(h)}(y_2 - y_3) + y^{(h)}(x_3 - x_2) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (x_2 y_3 - x_3 y_2) \right] \times \left[x^{(h)}(y_3 - y_1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + y^{(h)}(x_1 - x_3) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) \right] \right\} \\ &= \frac{N_c}{24} E(\gamma_h^2) \end{aligned} \quad (7)$$

同样可得

$$E(u_1 u_1) = \frac{N_c}{12} E(\gamma_h^2) \quad (8)$$

$$E(u_1 v_2) = 0 \quad (9)$$

其中, $E(\bullet)$ 表示求均值. 则 u_1 、 u_2 、 v_2 的相关系数为

$$\rho(u_1 u_2) = \frac{E(u_1 u_2)}{\sqrt{E(u_1 u_1)E(u_2 u_2)}} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

$$\rho(u_1 v_2) = 0 \quad (11)$$

同样可得

$$\begin{aligned} \rho(u_1 u_2) &= \rho(u_2 u_3) = \rho(u_3 u_1) \\ &= \rho(v_1 v_2) = \rho(v_2 v_3) = \rho(v_3 v_1) = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\rho(u_1 v_2) = \rho(u_2 v_3) = \rho(u_3 v_1) = 0 \quad (13)$$

当箔条取向在 4π 立体角上均匀分布时 $E(\gamma_h^2)$ 可取 $0.17\lambda^{2[1]}$. 则 $u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3$ 的协方差矩阵为

$$\mathbf{Z} = 0.17\lambda^2 N_c \times \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

若箔条云处的照射波能流密度为 W , 则上述协方差矩阵可以进一步写为

$$\mathbf{Z}_0 = \frac{Wd^2}{G_t R_0^2} \mathbf{Z} \quad (15)$$

其中, d 为转台与三元组距离, R_0 为箔条云到导引头距离, G_t 为三元组单元天线增益. 根据该协方差矩阵, 即可给出馈电系数的联合高斯概率密度函数的表达式. 由此可给出一个样本, 将该样本乘以下文中的 $s_a(0)$ 即可作为初始时刻的三元组馈电系数. 基于式(15)所给出的馈电系数, 其与辐射功率之间的关系为: 三元组各单元的辐射功率

$$p_i = 2|C_i|^2 \quad (16)$$

在仿真中, 可先由式(15)计算馈电系数, 再根据式(16)由馈电系数计算出辐射功率, 再由辐射功率计算馈电电压幅度. 而馈电电压的相位等于馈电系数的相位.

不考虑三元组单元之间的电磁耦合, 则三元组辐射的总平均功率为矩阵中对角元素之和. 若馈电系数不相关则其在原点处产生的平均能流密度为

$$S_c = \frac{\frac{Wd^2}{G_t R_0^2} \times 0.17\lambda^2 N_c \times \frac{1 \times 6}{12}}{4\pi d^2} \cdot G_t \quad (17)$$

而在原点处的实际平均能流密度为

$$S = \frac{\frac{Wd^2}{G_t R_0^2} \times 0.17\lambda^2 N_c \times \frac{1 \times 6 + 0.5 \times 12}{12}}{4\pi d^2} \cdot G_t \quad (18)$$

即对于原点处来讲, 实际平均能流密度是三元组馈电系数不相关时的两倍. 因此, 从物理角度讲, 互功率的存在表明仿真场在空间中存在统计意义上的干涉效应. 而干涉效应意味着在空间中存在干涉分布图, 存在方向性效应. 此处通过引入了恰当的互功率和互相关系数, 从而表征了箔条云散射场分布的空间相关性特征.

若对于不同的极化方式和姿态角分布, 只需将协

方差矩阵中的 $E(\gamma_n^2)$ 按不同的极化方式和姿态角分布分别计算即可。

由于各辐射单元的馈电系数的实部和虚部皆满足高斯分布,且实部虚部相互独立,因此仿真的电场强度的实部和虚部也满足高斯分布,从而其幅度满足瑞利分布,这与实际箔条云回波的幅度符合瑞利分布相符。

4 时间相关性复现

与待仿真的点目标一样,箔条云处于运动之中. 箔条云的运动包含箔条云整体的质心的运动和单根箔条相对于质心的运动. 这两种运动的径向分量分别影响箔条云回波功率谱的中心谱线的位置和功率谱的形状. 箔条云从箔条弹爆炸的时刻开始,不断进行扩散,直到到达一个相对稳定的状态. 本文仅考察处于稳定状态下的箔条云散射回波的仿真,且回波的统计特性满足平稳性. 对于单根箔条,其在空间中的速度可以表示为

$$\mathbf{v}_{\text{chaff}} = \mathbf{v}_{\text{center}} + \mathbf{v} \quad (19)$$

其中,矢量 $\mathbf{v}_{\text{center}}$ 为箔条云质心速度;矢量 \mathbf{v} 为箔条相对于箔条云质心的速度. 假设在考察时间段内,箔条云质心保持匀速直线运动. 在下文的分析中,对于一个时间微分 dt ,将运动分为两步处理. 首先令箔条云整体平移 $\mathbf{v}_{\text{center}} dt$ ——即每根箔条皆产生平移 $\mathbf{v}_{\text{center}} dt$,然后再考虑单根箔条相对于质心运动所产生的功率谱. 下面以某一三元组为例,给出其三个单元的馈电系数的时间历程. 在计算过程中,三元组馈电系数的中间结果以 c_i 表示,最终结果以 C_i 表示。

4.1 整体平移

记所要仿真的时长为 T ,时间步长为 Δt , $T = N\Delta t$,其中 N 为偶数. 箔条云质心在 $n\Delta t$ 时间内的位移为 $\mathbf{v}_{\text{center}} n\Delta t$,将其展开,可得

$$\mathbf{v}_{\text{center}} n\Delta t = n\Delta x \mathbf{e}_x + n\Delta y \mathbf{e}_y + n\Delta z \mathbf{e}_z \quad (20)$$

其中, \mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_y 、 \mathbf{e}_z 为单位矢量, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为 Δt 时间内沿该三个方向的位置移动量. 则第 $n+1$ 时刻相对于前一时刻的径向距离增量为

$$\Delta R(n+1) = R(n+1) - R(n) \quad (21)$$

其中, $R(n)$ 表示第 n 时刻的径向距离. 第 $n+1$ 时刻相对于前一时刻沿两个横向方向的角度增量为

$$\begin{aligned} \Delta\psi_x(n+1) &= \psi_x(n+1) - \psi_x(n) \\ &= \text{asin} \frac{x(0) + (n-1)\Delta x}{R(n+1)} - \text{asin} \frac{x(0) + n\Delta x}{R(n)} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta\psi_y(n+1) &= \psi_y(n+1) - \psi_y(n) \\ &= \text{asin} \frac{y(0) + (n-1)\Delta y}{R(n+1)} - \text{asin} \frac{y(0) + n\Delta y}{R(n)} \end{aligned} \quad (23)$$

则利用差分重心公式可得在某个时刻 $(n+1)\Delta t$ 三元组的单元馈电系数由于质心横向运动导致的相对于上一时刻的改变量应为^[12]

$$\Delta c_1(n+1) = -\Delta c_2(n+1) - \Delta c_3(n+1) \quad (24)$$

$$\Delta c_2(n+1) = \left[\Delta\psi_x \frac{\psi_{y_3} - \psi_{y_1}}{A} - \Delta\psi_y \frac{\psi_{x_3} - \psi_{x_1}}{A} \right] \times \sum_{i=1}^3 c_i(n) \quad (25)$$

$$\Delta c_3(n+1) = \left[\Delta\psi_x \frac{\psi_{y_1} - \psi_{y_2}}{A} - \Delta\psi_y \frac{\psi_{x_1} - \psi_{x_2}}{A} \right] \times \sum_{i=1}^3 c_i(n) \quad (26)$$

其中,

$$A = (\psi_{x_2} - \psi_{x_1})(\psi_{y_3} - \psi_{y_1}) - (\psi_{y_2} - \psi_{y_1})(\psi_{x_3} - \psi_{x_1}) \quad (27)$$

再考虑到质心径向运动所导致的距离相位改变,因此,在质心经过一个时间片段 Δt 运动后,馈电系数成为

$$\begin{aligned} c_i(n+1) &= [c_i(n) + \Delta c_i(n+1)] \exp[-2jk\Delta R(n+1)], \\ & i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (28)$$

4.2 云团内相对移动

箔条云回波的功率谱将中心频率平移为零后可以记作 $S(f)$. 则首先截取 $S(f)$ 的主要部分频段,并离散化为 $S'(l\Delta f)$, $-L/2 \leq l \leq L/2$, $\Delta f = 1/T$, T 为仿真的时长, $L+1$ 为离散点数. 使用莱斯法进行功率谱仿真^[13],记随机过程

$$s(n) = \sum_{l=-L/2+1}^{L/2} w_l \exp[j\vartheta_l + j2\pi(2l-1)\frac{\Delta f}{2}n\Delta t], \quad 0 \leq n \leq N \quad (29)$$

$$w_l = \sqrt{q S' \left(\left(l - \frac{1}{2} \right) \Delta f \right) \Delta f} \quad (30)$$

$$q = \frac{1}{\Delta f \sum_{l=-L/2+1}^{L/2} S' \left(\left(l - \frac{1}{2} \right) \Delta f \right) \Delta t = T/M} \quad (31)$$

其中, ϑ_l 为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量.

给出 $s(n)$ 的一个样本,记作 $s_a(n)$. 则第 $n+1$ 时刻三元组的第 i 个单元在该三元组中的馈电系数为

$$C_i(n+1) = c_i(n+1) \cdot s_a(n+1) \quad (33)$$

此即为馈电系数计算结果. 另外,功率谱反映的是箔条径向运动特性,云团内箔条的横向运动特性在此之所以不予考虑,是因为射频仿真所基于的原理是横向叠加合成,因此其云团内的横向运动可由前述的质心横向运动来表征.

上述过程是对处于某个三元组内的子区域箔条云的馈电系数的计算过程. 对不同的子区域和三元组重复上述过程,从而可以给出整个箔条云及其所对应的

多个三元组的馈电系数的计算结果.

5 数值验证

进行数值计算,对上述分析进行数值验证.数值计算中所用参数如下.工作频率 15 GHz.外场实际场景中:箔条云质心到导引头距离 10 000 m,10 万根箔条到导引头的距离均匀分布在 9 999 m 至 10 001 m,且在方位上均匀随机分布在三元组所张成的立体角内;每根箔条的取向在 4π 立体角中均匀随机分布;照射到箔条云处的入射波能流密度为 $W=1 \text{ W/m}^2$.微波暗室里的仿真场景中:三元组外接圆半径张角 20 mrad,三元组到转台距离 15 m,辐射单元在转台方向的天线增益为 $G_t=1$.

仿真初始参数:对该 10 万根箔条在上述空间范围内进行随机抛洒 1 000 次,获得 1 000 个箔条云样本,在每个箔条云样本中每根箔条的位置和取向皆给定.在每个样本中,根据每根箔条的取向可以计算出其 RCS,进而求出式(6)中的 σ_n .将每个箔条云样本里的每根箔条的位置所对应的馈电系数由式(5)给出,再按照式(6)进行加权叠加,可得该箔条云样本的仿真馈电系数之初始值.

仿真演变参数:仿真时长 5 s,PRF=4 000 Hz;相对质心速度在 x,y,z 三个方向上皆为高斯分布,均方根皆为 4 m/s,质心速度在 x,y,z 三个方向上皆为 8 m/s.

图 2 给出了在上述的箔条云运动参数下某个样本的各单元馈电系数的时间演化过程.

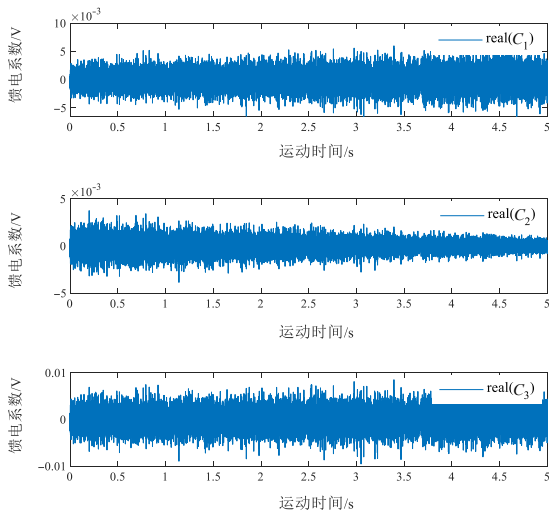


图 2 馈电系数的时间历程

对该 1 000 个箔条云样本对应的 1 000 组初始馈电系数样本进行统计分析,可得馈电系数的协方差矩阵为

$$\bar{Z}'_0 = \frac{d^2}{R_0^2} \times 0.17\lambda^2 N_c \times \frac{1}{12} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.4715 & 0.5076 & -0.045 & -0.0127 & 0.0047 \\ 0.4715 & 1 & 0.4999 & -0.0891 & -0.0436 & -0.0519 \\ 0.5076 & 0.4999 & 1 & -0.0261 & 0.04 & 0.0177 \\ -0.045 & -0.0891 & -0.0261 & 1 & 0.5045 & 0.4972 \\ -0.0127 & -0.0436 & 0.04 & 0.5045 & 1 & 0.5035 \\ 0.0047 & -0.0519 & 0.0177 & 0.4972 & 0.5035 & 1 \end{bmatrix}$$

(34)

可以看到,该式结果与理论分析结果式(15)基本吻合.

在外场场景与仿真场景下,基于图 1 所示坐标系,使用 1 000 个箔条云样本以及其对应的 1 000 组初始馈电系数样本,分别对导引头口径面上的四个接收点 $P_1(l/2, 0, 0)$ 、 $P_2(0, l/2, 0)$ 、 $P_3(-l/2, 0, 0)$ 、 $P_4(0, -l/2, 0)$ 处的电场强度进行相关性计算,如图 3 所示.其中 l 为基线长度.图 4~6 给出了相关系数随基线长度的三条变化曲线.图 4~6 中红色实线为各点在外场环境下接收到场强的相关系数;蓝色虚线为各点在微波暗室仿真环境下的仿真场强的相关系数;绿色点划线为各点接收到的相互独立的馈电系数所给出的仿真场强的相关系数,以兹比较.

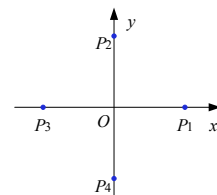


图 3 所考察的四个电场场强接收点位置示意图

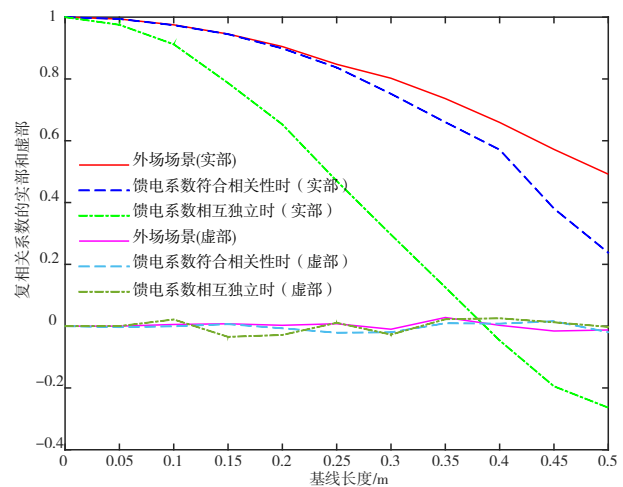


图 4 电场强度的相关系数(点 1 和点 3 处)

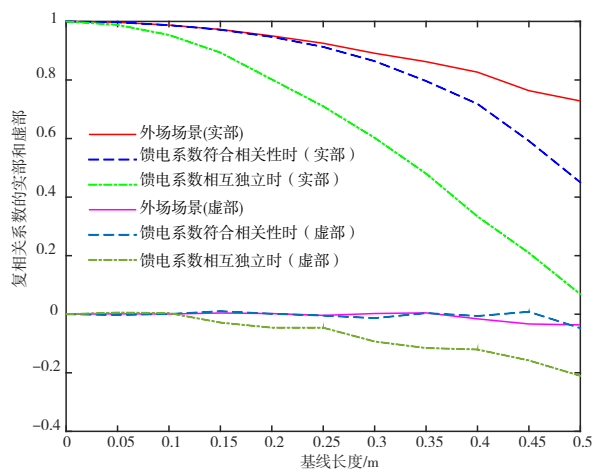


图5 电场强度的相关系数(点1和点2处)

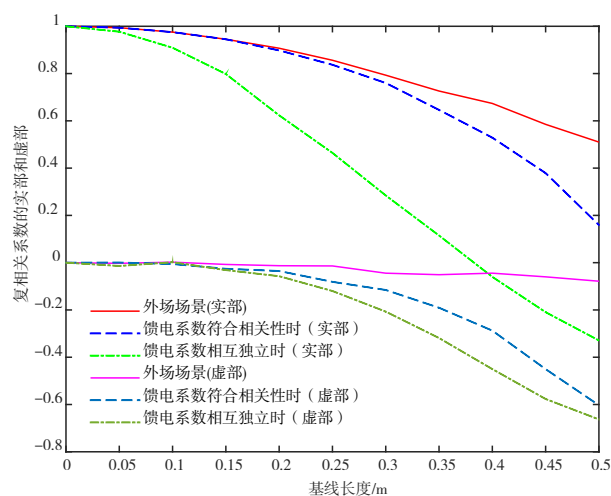


图6 电场强度的相关系数(点2和点4处)

由图4~6可以看到,使用式(15)给出的馈电系数,其仿真场的空间相关性可以较好地逼近实际外场的空间相关性,特别是在基线较小的情况下。

根据1 000组图1所示的馈电系数历程的样本,可得转台处电磁场能流密度的功率谱密度如图7所示。图中的仿真场的功率谱曲线与理论值相符。功率谱的中心频率反映了箔条云质心的径向运动,其横向运动可由 P_1 点与 P_3 点处、 P_2 点与 P_4 点处的电场强度的相位差来考察。图8给出了某个样本下,相位差随时间的变化历程。由图8可以看到,随着时间的推移,相位差在产生连续的改变。这表明箔条云整体随着时间推移在横向上产生连续平移。综上,箔条云质心的径向、横向运动效果皆可被复现。

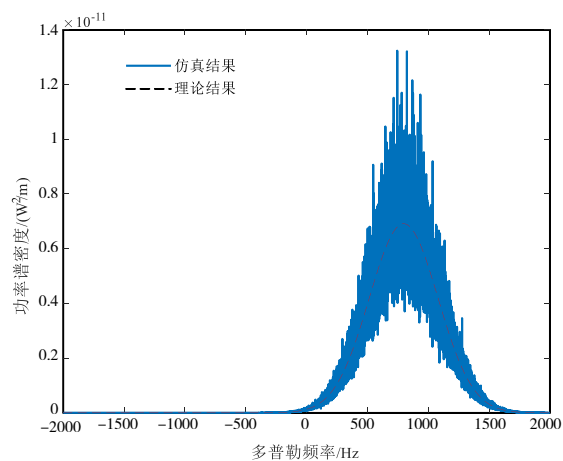


图7 转台处电磁能流的功率谱密度

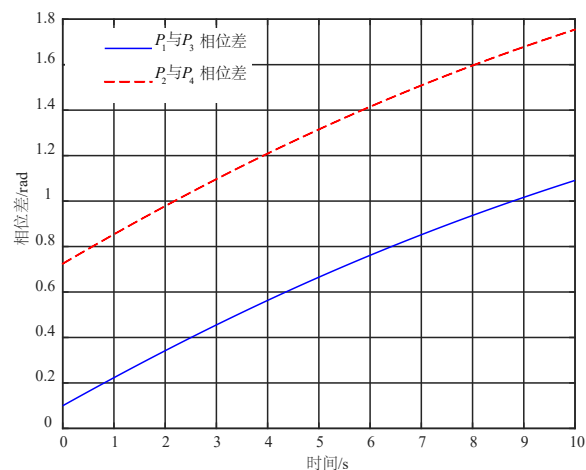


图8 各接收点处电场强度相位差(基线0.2 m)

6 结论

本文给出的箔条云半实物射频仿真三元组馈电系数计算流程,可以复现所要仿真的箔条云回波的空间相关性和时间相关性。通过满足高斯分布且满足一定的协方差矩阵的三元组馈电系数的计算,可以保证仿真回波的空间相关性;通过差分重心公式以及相移可以复现箔条云回波的质心运动效果;通过功率谱对馈电系数加权可以复现回波功率谱。在后续工作中将进一步展开对距离门走动和大视角变化下的情况的研究。

参考文献

- [1] CA 瓦金, ЛН 舒斯托夫. 无线电干扰和无线电技术侦察基础[M]. 《无线电干扰和无线电侦察技术基础》翻译组, 译. 北京: 科学出版社, 1977.

- [2] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
CHEN J. Principles of Radar Chaff Jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [3] TANG B, GUO K Y, WANG J P, et al. The correlation characteristics of channel matrix of chaff-supported MIMO system[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 1509-1512.
- [4] 李金梁, 来庆福, 李永祯, 等. 基于极化对比增强的导引头抗箔条算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 268-271.
LI J L, LAI Q F, LI Y Z, et al. Anti-chaff algorithm for seekers based on polarimetric contrast enhancement[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 268-271. (in Chinese)
- [5] 杨学斌. 箔条云团的扩散模型与回波模型[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
YANG X B. Diffusion Model and Echo Model of Chaff Cloud[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. (in Chinese)
- [6] 李正顺, 刘金. 美国埃格林空军基地半实物仿真试验 20 年[J]. 飞航导弹, 1999(3): 41-45.
LI Z X, LIU J. HWIL in US Eglin AFB for 20 years[J]. Winged Missiles Journal, 1999(3): 41-45. (in Chinese)
- [7] 陈训达. 射频仿真中的双近场效应[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1): 92-95.
CHEN X D. The dual near-field effect in radio frequency simulation[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2001, 13(1): 92-95. (in Chinese)
- [8] 蒋庆平. 宽带主/被动射频仿真技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
JIANG Q P. The Research on Broadband Active/Passive Radio Frequency Simulation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [9] 刘地凯. 多元矢量合成近场效应误差修正研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LIU D K. Near Field Error Correction of Multiple Vector Synthesis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [10] 武鹏飞, 何秋茹. 幅相控制精度对射频仿真目标位置误差的影响[J]. 现代防御技术, 2016, 44(6): 167-173.
WU P F, HE Q R. Influence of amplitude and phase precision for target position error in RF[J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(6): 167-173. (in Chinese)
- [11] 何骁, 章锦文, 田建伟. 射频仿真多辐射中心方案设计及幅相误差分析[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 111-116.

HE X, ZHANG J W, TIAN J W. Project design for RFSS of multi-radiation centers and its amplitude and phase error analysis[J]. Computer Simulation, 2010, 27(4): 111-116. (in Chinese)

- [12] 唐波, 盛新庆. 基于差分重心公式的射频仿真近场修正算法[J]. 电子学报, 2018, 46(6): 1336-1342.

TANG B, SHENG X Q. Algorithm of near-field-error correction in RFSS based on the differential formula of mass center[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 1336-1342. (in Chinese)

- [13] PÄTZOLD M. Mobile Fading Channels[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

作者简介



唐 波 男, 1978 年生于江苏. 现为北京科技大学计算机与通信工程学院副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为射频仿真、信号处理、无线信道仿真.

E-mail: tangbo@ustb.edu.cn



鲁嘉洪 女, 2000 年生于山东. 现为北京科技大学计算机与通信工程学院硕士研究生, 主要研究方向为射频仿真、信号处理.

E-mail: lj_200817@163.com



郭琨毅 女, 1976 年生于河北. 现为北京理工大学集成电路与电子学院射频技术与软件研究所教授, 博士生导师. 主要研究方向为雷达目标特性、散射中心参数化建模.

E-mail: guokunyi@bit.edu.cn



盛新庆 男, 1968 年生于安徽. 现为北京理工大学集成电路与电子学院射频技术与软件研究所博士生导师, 讲席教授. 主要研究方向为计算电磁学、目标电磁特性与隐身设计、复杂电磁环境仿真等. 中国电子学会会员编号: E190008149M.

E-mail: xsheng@bit.edu.cn