

引用格式:万婷,钱嵩松,朱任卿.时空可控点聚焦 FDA 的动目标跟踪研究[J].电光与控制,2019,26(7):56-59. WAN T, QIAN S S, ZHU R Q. Moving target tracking based on time-space steerable point-focusing FDA[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7):56-59.

时空可控点聚焦 FDA 的动目标跟踪研究

万婷, 钱嵩松, 朱任卿

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要:提出了一种基于多载频时间调制频偏的时空可控点聚焦频率分集阵列天线。首先,实现对动目标的跟踪,在频偏中引入一个时间补偿因子,以避免可能出现的频率奇异性,使得连续频率调制的持续时间远大于周期调制的持续时间;然后,根据目标实时位置计算频偏,实现目标在运动全程中保持波束聚焦于目标点处;最后,通过运动目标跟踪的仿真算例验证了方法的有效性。

关键词:频率分集阵列天线;时空可控点聚焦;动目标跟踪;时间补偿因子

中图分类号: TN911.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.011

Moving Target Tracking Based on Time-Space Steerable Point-Focusing FDA

WAN Ting, QIAN Song-song, ZHU Ren-qing

(School of Electronics and Optics Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A time-space steerable point-focusing Frequency Diverse Array (FDA) antenna based on multi-carrier frequency with time-modulated frequency offset is proposed. In order to achieve the tracking of the moving target, a time compensation factor is introduced in the frequency offset to avoid the possible frequency singularity, so that the duration of the continuous frequency modulation is much longer than that of the periodic modulation. Then the frequency offset is calculated according to the real-time position of the target to achieve the goal of keeping the beam focused on the target throughout the whole process of its motion. Finally, a simulation example of moving target tracking is given to verify the effectiveness of the method.

Key words: Frequency Diverse Array (FDA) antenna; time-space steerable point-focusing; moving target tracking; time compensation factor

0 引言

频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)天线^[1]通过在天线阵因子中引入变量时间 t 和距离 r ,不仅可以在固定方向上形成波束聚焦,还可以在固定点上形成波束聚焦,使得FDA在诸多领域具有广泛的应用前景。影响FDA波束聚焦性能的关键因素在于激励频偏,在早期的FDA研究中通常采用线性频偏的激励,对应的天线辐射方向图在时间维 t 、距离维 r 以及方向维 θ 之间存在严重耦合^[2],导致了聚焦点不唯一且不固定。为此,KHAN等提出采用连续时间调制频

偏解耦时间与空间的相互作用^[3],利用对数递增频偏解耦方向与距离的相互作用^[4];YAO等结合上述两种方法,提出了时间调制对数递增频偏方案,完全解耦了不同变量维之间的相互作用并实现了固定点聚焦^[5],还提出采用时分方法来实现多目标点聚焦^[6];SHAO等提出了一种基于多载波频率增量的对称FDA,使得点聚焦波束效果更理想,并采用凸优化算法优化激励系数以实现多目标聚焦,但是该方法仅能够应用在有限空间内,在优化区域外仍可能存在很多其他的强聚焦点^[7];WANG等也提出了一种基于非线性时变频偏与时分法的多目标时不变聚焦FDA^[8],与文献[7]相比,它通过增加一个新的求和模块减少了激励源的数量,但是求和模块的实现又是新的难点。

与上述文献中所提及的全是固定点目标聚焦的方法相比,本文提出了一种全时空可控点聚焦FDA实现

收稿日期:2018-06-11

修回日期:2018-09-10

作者简介:万婷(1994—),女,安徽安庆人,硕士生,研究方向为毫米波天线。

动目标跟踪。当目标运动时,时间调制频偏也不再是周期性变化,若继续采用上述文件中的频偏计算公式,有可能会产生奇异性。为此在频偏中引入一个时间补偿因子来消除可能的奇异性,使得频偏调制的持续时间更长。此外,时间补偿因子还提供了一个额外的自由度,可以用来调整频偏大小。

本文首先推导了这种新型 FDA 方向图的计算式,然后给出了一个动目标跟踪的计算分析实例,验证了所提方法的有效性。

1 时空可控点聚焦 FDA 的基本理论

1.1 阵列结构及阵因子

本文采用时变频偏多载波的阵列模型,见图1。

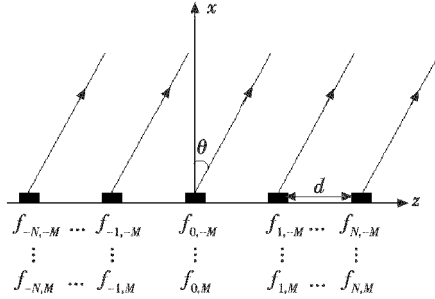


图1 天线阵结构示意图

Fig.1 Array structure of FDA

该天线阵共有 $2N+1$ 个阵列单元,相邻阵元间距为 d ,每个阵元均由 $2M+1$ 个源同时激励,那么第 n 阵元的第 m 个激励源的频率可以表示为

$$f_{m,n} = f_0 + \Delta f_{m,n} = f_0 + (\Delta f_m + \Delta f_n) \quad (1)$$

式中: $m \leq M; n \leq N$ 。则对应的激励为

$$S_{m,n}(t) = I_{m,n} e^{j(2\pi f_{m,n} t + \varphi_{m,n})} \quad (2)$$

该激励在空间点 (θ, r) 处产生的场强为

$$s_{m,n}(\theta, r, t) = \frac{I_{m,n}}{r_n} s_{m,n}(t - \frac{r_n}{c}) \approx e^{j2\pi f_0 t} \frac{e^{-j\beta r}}{r} I_{m,n} e^{j2\pi(\Delta f_m + \Delta f_n)(t - \frac{r - nd \sin \theta}{c})} e^{j\beta nd \sin \theta} e^{j\varphi_{m,n}} \quad (3)$$

式中: θ 为空间点的方位角; r_n 为空间点与第 n 个阵元之间的距离,相位常数 $\beta = 2\pi/\lambda_0$; $\varphi_{m,n}$ 为第 n 个阵元的第 m 个激励源产生的补偿相位因子。每个阵元的幅度衰减近似为 $1/r$,相邻阵元间的相位差表示为 $r - nd \sin \theta$,则 FDA 的阵因子可以表示为

$$AF(\theta, r, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{m,n} e^{j2\pi(\Delta f_m + \Delta f_n)(t - \frac{r - nd \sin \theta}{c})} e^{j\beta nd \sin \theta} e^{j\varphi_{m,n}} \quad (4)$$

一般地,式(4)中的 $[2\pi(\Delta f_m + \Delta f_n)nd \sin \theta]/c$ 称为二次相位因子,根据文献[9]中的通用准则,如果该项因子能够满足条件

$$\left| 2\pi(\Delta f_m + \Delta f_n) \frac{nd}{c} \right| \leq \frac{\pi}{16} \quad \forall n, m \quad (5)$$

那么在后续分析中该项因子的影响就可以忽略不计,则式(4)可以简化为

$$AF(\theta, r, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{m,n} e^{j2\pi(\Delta f_m + \Delta f_n)(t - \frac{r}{c})} e^{j\beta nd \sin \theta} e^{j\varphi_{m,n}} \quad (6)$$

由此可得距离维聚焦和方向维聚焦各自独立可控。

要使任意的时刻 t 方向图都聚焦于目标点 (r_0, θ_0) 处,可以通过 $\varphi_{m,n}$ 的一部分来补偿方向聚焦项 $\exp(j\beta nd \sin \theta)$ [10-11],由 $\varphi_{m,n}$ 的剩余部分及 $\Delta f_m, \Delta f_n$ 共同补偿距离聚焦项 $\exp(j2\pi(\Delta f_m + \Delta f_n)(t - r/c))$ [12]。为此取

$$\begin{cases} g(m) = \kappa \ln(m + M + 1) \\ g(n) = \kappa \ln(n + N + 1) \\ g(m, n) = g(m) + g(n) \end{cases} \quad (7)$$

式中:无量纲常数 κ 为频率转换因子,可用于控制改变频偏 $\Delta f_m, \Delta f_n$ 的大小。

对于固定点目标,周期性的频偏周期变化是合适的,但是对于运动目标,目标位置的连续变化会导致频偏不再具有周期性,此时最好使频偏随着时间增加连续变化。为此引入了时间补偿因子 t_{co} ,并使之满足 $t_{co} > r_0/c$ 以消除可能的奇异点,对应的单元频偏和相位补偿因子可表示为

$$\begin{cases} \Delta f_m = \frac{g(m)}{t + t_{co} - r_0/c} \\ \Delta f_n = \frac{g(n)}{t + t_{co} - r_0/c} \\ \varphi_{m,n} = - \left[2\pi g(m, n) \left(1 - \frac{t_{co}}{t + t_{co} - r_0/c} \right) + \beta nd \sin \theta_0 \right] \end{cases} \quad (8)$$

显然对应的 $\varphi_{m,n}$ 是连续变化而不是周期性的。将式(7)和式(8)代入式(6)可得

$$AF(\theta, r, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{m,n} e^{j2\pi g(m, n) \frac{t + t_{co} - r/c}{t + t_{co} - r_0/c} - 1} e^{j\beta nd(\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (9)$$

由式(9)可见,空间点 (r_0, θ_0) 在任意时刻 t 都处于最大值,整个空间中有且仅有此一处聚焦点。但是当 $t + t_{co} \gg r_{max}/c > r_0/c$ 时,距离聚焦项将会消失,即此时的 FDA 不再具有距离聚焦能力。为了解决这个问题,增加如下约束条件:令 $r = r_0 \pm \Delta r$ 时,波束幅值的绝对值不超过最大值的 $1/k$,即

$$\left| \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{m,n} e^{j2\pi g(m, n) \left[\frac{(t_{max} + t_{co}) - (r_0 \pm \Delta r)/c}{(t_{max} + t_{co}) - r_0/c} - 1 \right]} \right| \leq \frac{1}{k} \left| \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{m,n} \right| \quad (10)$$

式中: Δr 是一个给定距离; t_{max} 是最大允许持续时长,通过限定 $t_{max} + t_{co}$ 保证聚焦能力。

对于一个给定的天线阵列,可以通过简单测试得到关于 $t_{max} + t_{co}$ 的近似解,再结合式(5)、式(7)和式

(8) 计算频率转换因子 κ 的上界为

$$\kappa \leq \kappa_{\max} = \frac{1}{32} \frac{c}{Nd \ln[(2M+1)(2N+1)]} (t_{\max} + t_{\infty}) \quad (11)$$

在实际操作中,计算 $t_{\max} + t_{\infty}$ 时首先给出一个 κ 的测试值并计算对应的 $t_{\max} + t_{\infty}$ 值,然后再利用式(11)验算给定的 κ 是否满足要求。

需要说明的是,若目标运动持续时间太长,则需将总时间分成几段进行计算,但是此处的每个分段时长还是远大于上述参考文献中的调制周期时长。

1.2 动目标跟踪

现假设目标是运动的,即式(9)中的 (r_0, θ_0) 是随时间而变的,为简单起见,假设目标以速度 v 做匀速运动,其运动参数方程为

$$\begin{cases} x_0 = r_{in} \sin \theta_{in} + v_x t \\ y_0 = r_{in} \cos \theta_{in} + v_y t \end{cases} \quad (12)$$

式中: v_x, v_y 分别为 x 方向和 y 方向的运动分速, $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$; (r_{in}, θ_{in}) 为初始点目标的距离和方位角,对于任意时刻点 t ,目标位置可以表示为

$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{(r_{in} \sin \theta_{in} + v_x t)^2 + (r_{in} \cos \theta_{in} + v_y t)^2} \\ \theta_0 = \arctan \frac{r_{in} \sin \theta_{in} + v_x t}{r_{in} \cos \theta_{in} + v_y t} \end{cases} \quad (13)$$

此时的 (r_0, θ_0) 随着时间的变化而改变,即对应的 FDA 聚焦点会跟随目标而动。

2 仿真算例

现假设匀速运动目标的初始位置为 $(r_{in}, \theta_{in}) = (90 \text{ km}, 30^\circ)$,速度 $v = 2 \text{ km/s}$,这一设定已高于目前大多数战术导弹的飞行速度^[13],其 x 方向分速 $v_x = -1.5 \text{ km/s}$,总运动时长 50 s ^[14]。根据式(13)该目标在 $t-r$ 坐标系和 $t-\theta$ 坐标系下的运动轨迹如图2所示。

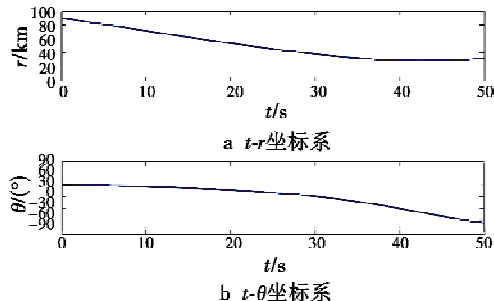


图2 目标在 $t-r$ 坐标系和 $t-\theta$ 坐标系的运动轨迹图

Fig. 2 Trajectories of the target in $t-r$ and $t-\theta$ coordinates

算例仿真参数设置为:工作频率 $f_0 = 10 \text{ GHz}$,频率转换因子 $\kappa = 5E6$,阵元间距 $d = \lambda_0/2$,时间补偿因子 $t_{\infty} = 10 \text{ s}$,激励源数 $M = 20$,阵元数 $N = 20$,激励幅值 $I_{mm} = 1$,每个激励的频偏 Δf 可以根据式(7)和式(8)计算得出;令 $\Delta r = 2 \text{ km}$, $k = 10$,通过验算得出频率转换

因子 κ 和时间补偿因子 t_{∞} 满足式(10)要求,且 κ 也满足式(11)的约束条件。

当 $t = 19.975 \text{ s}$ 时,目标运动至点 $(53.67 \text{ km}, 16.27^\circ)$ 处,此时 $r-\theta$ 域上的 FDA 波束方向图如图3所示,即为式(9)所对应的归一化值,可以看出聚焦点与目标点的位置相一致。 $t-r$ 域和 $t-\theta$ 域内的 FDA 波束方向图分别如图4和图5所示,将图4、图5分别与图2进行比较,可发现 FDA 聚焦点的运动轨迹与目标点的运动轨迹是完全一致的。

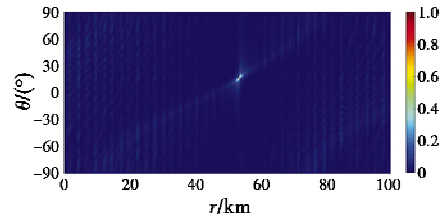


图3 给定时刻点的 $r-\theta$ 域 FDA 方向图

Fig. 3 $r-\theta$ beam pattern of FDA at a given moment

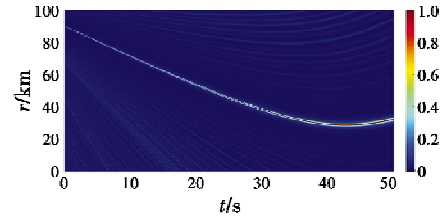


图4 目标运动全程中的 $t-r$ 域 FDA 方向图

Fig. 4 $t-r$ beam pattern of FDA during the whole motion process of the target

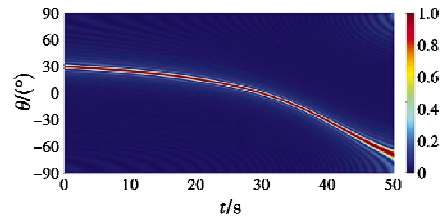


图5 目标运动全程中 $t-\theta$ 域 FDA 方向图

Fig. 5 $t-\theta$ beam pattern of FDA during the whole motion process of the target

正如上文所提到的,时间补偿因子 t_{∞} 也可以用于调节频偏,对于给定的某时刻点,在一定范围内改变 t_{∞} ,虽然频偏变化量很大,但不会对波束方向图产生较大的影响。令 $t = 19.975 \text{ s}$,天线阵其他参数不变,分别计算 t_{∞} 为 $10^{-3} \text{ s}, 10 \text{ s}, 10^3 \text{ s}$ 时对应的不同波束方向图,其中单元频偏 Δf_n 与扫描时间 t 的关系曲线如图6所示,距离维上的波束方向图如图7所示。

由图6可以看出,频偏是时变连续函数但并不具有周期性;虽然 $t_{\infty} = 10^{-3} \text{ s}$ 时的频偏远大于 $t_{\infty} = 10 \text{ s}$ 时的频偏,但是两者的聚焦波束宽度差别很小。另一方面,从图7可以看出,当 t_{∞} 太大或者是 t 持续时间过

长时, FDA 的距离维聚焦能力将被大大削弱, 若 t_{∞} 继续增大将导致 FDA 失去距离维上的聚焦能力。因此, 为了保证在目标运动全过程内 FDA 都具有点聚焦能力, 应该选择一个合理的时间补偿因子 t_{∞} 。

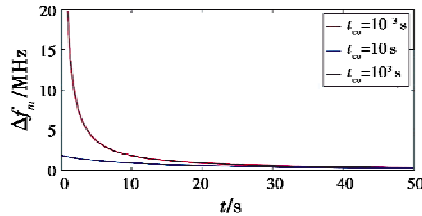


图6 3个 t_{∞} 值对应的频偏 Δf_m

Fig. 6 Δf_m of different t_{∞}

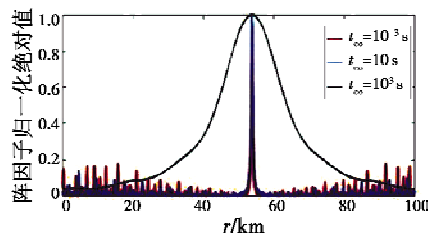


图7 3个 t_{∞} 值对应的距离维波束宽度

Fig. 7 Beamwidth in range dimension of different t_{∞}

3 结论

本文提出了一种时空可控点聚焦 FDA 方法。首先, 通过在频偏中引入时间补偿因子解决了频率随时间增加变化而可能遇到的奇异性问题; 然后, 根据目标的实时位置计算时间调制频偏, 使得提出的 FDA 方法可以实现动目标跟踪; 最后, 给出了动目标跟踪的仿真算例, 验证了该方法的有效性。通过仿真可知, 本文方法在飞行器跟踪、秘密点对点通信、无线功率传输等领域均可能有着广泛的应用前景。

参考文献

[1] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Frequency diverse array radars[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2006:215-218.
 [2] SECMEN M, DEMIR S, HIZAL A, et al. Frequency diverse array antenna with periodic time modulated pattern in range and angle[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2007:427-430.

[3] KHAN W, QURESHI I M. Frequency diverse array radar with time-dependent frequency offset[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2014, 13(6):758-761.
 [4] KHAN W, QURESHI I M, SAEED S. Frequency diverse array radar with logarithmically increasing frequency offset[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14(3):499-502.
 [5] YAO A M, WU W, FANG D G. Frequency diverse array antenna using time-modulated optimized frequency offset to obtain time-invariant spatial fine focusing beampattern[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(10):4434-4446.
 [6] YAO A M, WU W, FANG D G. Solutions of time-invariant spatial focusing for multi-targets using time modulated frequency diverse antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(2):552-566.
 [7] SHAO H, DAI J, XIONG J, et al. Dot-shaped range-angle beampattern synthesis for frequency diverse array[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15:1703-1706.
 [8] WANG Y, LI W, HUANG G, et al. Time-invariant range-angle dependent beampattern synthesis for FDA radar targets tracking[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017, 16:2375-2379.
 [9] FAROOQ J. Frequency diversity for improving synthetic aperture radar imaging[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2009.
 [10] 高峰, 和凯, 宋智源, 等. 5G 大规模紧耦合阵列天线研究[J]. 电信科学, 2015, 31(5):30-35.
 [11] 李龙军, 王布宏, 夏春和. 稀疏共形阵列天线方向图综合[J]. 电子学报, 2017, 45(1):104-111.
 [12] 王思铭, 高军, 曹祥玉, 等. 基于超表面的低雷达散射截面宽频贴片阵列天线设计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(9):2273-2280.
 [13] 吴孙勇, 宁巧娇, 蔡如华, 等. 基于 PHD 滤波的箱粒子划分多目标跟踪算法[J]. 电光与控制, 2018, 25(5):12-16.
 [14] 武青海, 曲朝阳. 基于 IMM-极限迭代 UFIR 的机动目标跟踪算法[J]. 电光与控制, 2018, 25(6):35-38, 51.