2013年6月

文章编号: 2095-4980(2013)03-0420-05

基于频率分集阵列的聚束 SAR 虚拟辐射源

张福丹

(南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:频率分集阵列作为一种新型阵列天线模型,无需移相器就可在空间实现波束扫描。 基于频率分集均匀线阵模型,研究了聚束合成孔径雷达系统发射信号传输特性,引出了虚拟辐射 源的概念,对其位置进行分析,与实际辐射源位置进行比较,可有效提高成像方位向分辨力,对 于提高雷达隐身性能和进行电子欺骗也具有重要意义。计算机仿真实验验证了理论推导的准确性。 关键词:频率分集阵列;聚束合成孔径雷达;虚拟辐射源;虚拟辐射角

中图分类号: TN958 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201303.0420

Virtual radiation source of a spotlight SAR based on frequency diverse array

ZHANG Fu-dan

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: The Frequency Diverse Array(FDA) is a new type of array antenna which can perform beam scanning without phase shifters. The signal propagation feature of spotlight Synthetic Aperture Radar(SAR) is analyzed based on linear FDA. The location of the virtual radiation source is discussed and compared to the real radiation source. It can be used to improve cross-range resolution in spotlight SAR and is of great importance to radar stealth-technology and electronic deception. Simulation results have verified the accuracy of the theoretical derivation.

Key words: Frequency Diverse Array; spotlight Synthetic Aperture Radar; Virtual radiation source; apparent radiation angle

传统机扫天线需要依靠平台的机械转动以实现 360°全方位扫描。天线的惯性导致功耗较大,扫描速度缓慢, 精确度低,可靠性不高。20 世纪五六十年代以相控阵为代表的电子扫描技术的出现弥补了机扫天线的不足,依 靠移相器实现波束扫描,具有速率高、精确度高的特点^[1]。频率扫描天线(简称频扫天线)由于结构紧凑,实现方 便,波束转换速度快,作为电子扫描的另一种方式曾被广泛使用,它的波束依靠改变雷达的工作频率实现扫描, 但由于在某角度工作频率恒定,容易被截获^[2-3]。

2006 年 Antonik P 等人在此基础上研究提出了一种新型阵列天线,即频率分集阵列^[4-6]。该阵列通过在各个 阵元发射信号依次引入一个线性频率增量,即可实现波束扫描,而且无需移相器,这突破了传统相控阵天线对移 相器的依赖,可以使天线阵列结构更为简化。

Huang Jingjing 等人通过实验对频率分集阵列辐射特性进行分析,发现该阵列天线波束指向随着距离变化逐渐改变^[7-8],这使得波束扫描更为灵活,可减少信号传播多径影响^[4],"弯曲"的波束扫描^[4]也可在一定程度上降低信号被截获概率。Baizert P 指出频率分集阵列技术用于地面动目标显示(Ground Moving Target Indication,GMTI),可获得高于传统单频阵列 40 dB 的信杂比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)^[9]。Jawad Farooq提出将频率分集用于聚束合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像中,利用其特有的"弯曲"电磁波能量分布特性,能有效提高方位向分辨力^[10-11]。

本文对于基于聚束 SAR 模型的频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)信号传输特性进行分析,推导出 FDA 的虚拟辐射源、虚拟辐射角以及虚拟视距,并通过计算机仿真验证了理论推导的准确性及其对聚束 SAR 方位向分辨力的改善。

第3期

1 传统聚束 SAR 系统模型

1.1 传统聚束 SAR 坐标系统模型

图 1 是传统聚束 SAR 坐标系统模型,聚束 SAR 平台沿着平 行于 y 轴的航迹飞行,3 个坐标系统(X,Y,Z),(x̂, ŷ, ẑ)和(x̂', ŷ', ẑ') 分别表示参照坐标系、雷达平台坐标系以及场景坐标系。**R**和**R**'分 别表示雷达平台和场景中心。场景中心和雷达平台相距**r**₀,**r**'表示 场景中的任意一目标点,**r**为平台至这一目标的距离。根据经典聚 束 SAR 坐标系统模型,平台至场景中心距离矢量**r**₀可以表示成:



$$k_x = \cos \psi_0 \cos \theta_0, \quad k_y = \cos \psi_0 \sin \theta_0, \quad k_z = \sin \psi_0 \tag{2}$$

场景中心单位向量
$$\hat{r}_0$$
为: $\hat{r}_0 = \hat{x}k_x + \hat{y}k_y + \hat{z}k_z$ 。对于沿着 y 轴飞行的雷达平台,其瞬时位置矢量 $\overline{R}(t)$ 为:

$$\overline{R}(t) = \hat{x}R_x(t) + \hat{y}R_y(t) + \hat{z}R_z(t)$$
(3)

式中 $R_x(t), R_y(t), R_z(t)$ 分别表示雷达在 3 个坐标方向的瞬时位移量, $R_x(t) = R_{x0} + v_x t + \frac{1}{2}a_x t^2$, $R_y(t) = R_{y0} + v_y t + \frac{1}{2}a_y t^2$, $R_z(t) = R_{z0} + v_z t + \frac{1}{2}a_z t^2$, v_x, v_y, v_z 分别表示瞬时速度, a_x, a_y, a_z 分别为对应的瞬时加速度, R_{x0}, R_{y0}, R_{z0} 分别代表雷达平

台在 3 个坐标方向的初始位置。场景中心矢量 \bar{R}' 可以表示:

$$\overline{\mathbf{R}}' = \hat{\mathbf{x}} X_{c} + \hat{\mathbf{y}} Y_{c} + \hat{\mathbf{z}} Z_{c}$$
⁽⁴⁾

式中 (X_c, Y_c, Z_c) 为场景中心坐标。如图 1 所示, r_0 可以表示成:

综合式(5)和式(1)可以解得:

$$\theta_0(t) = \arctan \frac{Y_c - R_y(t)}{X_c - R_x(t)}, \quad \psi_0(t) = \arcsin \frac{Z_c - R_z(t)}{r_0(t)}$$
(6)

1.2 传统聚束 SAR 阵列信号模型

在传统相控阵模式聚束 SAR 平台中各阵元位于图 1 中坐标系统某一点,其发射信号可以简写成复指数形式: $s(t) = \exp(j\omega_0 t)$ (7)

式中 ω 为发射信号角频率,各阵元的发射角频率相同。当传播至场景中某一目标点处时,信号可以表示:

$$s(t, \overline{k}) = \exp\left[j(\omega_0 t - \overline{k}_0 \overline{r})\right]$$
(8)

式中: k 为波数; $\bar{k}_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{r}_0$ 。而当场景满足远场条件时, $\bar{r} = \bar{r}_0$,则式(8)可以表示成:

$$(t, \bar{k}) = \exp[j\omega_0(t-t_0)], \quad t_0 = \sqrt{[x - R_x(t)]^2 + [y - R_y(t)]^2 + [z - R_z(t)]^2} / c$$
(9)

由式(9)可见在远场处,球面波可等效成平面波,该平面即为此点处球面波的切平面。信号传播的相位延迟 可以准确地用时间延迟来表示。在聚束 SAR 系统中,虽然信号相位是在三维空间进行积累,但由于在平台的相 干积累时间里,照射目标的俯仰角近似恒定,则平面波可以近似看做与俯仰维平行,因此球面与水平面内的交线 的切线斜率 ∂x / ∂y,即可等效成等相位面的斜率,也就是平面波的传播方向。

2 FDA 聚束 SAR 虚拟辐射源

考虑一个 N 元等距均匀线阵位于聚束 SAR 雷达平台平行于 Y 轴的航迹上, 阵元辐射各向同性, 相邻间距为 半波长, 且无电磁耦合, 阵列初始载频为 f₀, 相邻阵元间发射频率有一个固定频率差 Δf_y, 从第 1 个阵元往后频 率依次线性递增,这就是 FDA 模型。现假设发射信号模型仍为 1.2 中的单频信号,则分析可得,传播至场景中

$$s_{\mathrm{T}}(t, \vec{r}', \vec{r}_{0})_{\mathrm{FDA}} = \exp\left\{j\left[\omega_{0} + \left(\frac{N-1}{2}\right)\Delta\omega_{y}\right](t-t_{0})\right\} \cdot \exp\left\{-j\left[k_{0} + \left(\frac{N-1}{2}\right)\Delta k_{y}\right]\hat{r}_{0}\vec{r}'\right\} \cdot \exp\left\{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)k_{0}d_{y}k_{y}\right\} \cdot \frac{\sin\left\{\frac{N}{2}\left[\Delta\omega_{y}(t-t_{0}) - k_{0}d_{y}k_{y} - \Delta k_{y}\hat{r}_{0}\vec{r}'\right]\right\}}{\sin\left\{\frac{1}{2}\left[\Delta\omega_{y}(t-t_{0}) - k_{0}d_{y}k_{y} - \Delta k_{y}\hat{r}_{0}\vec{r}'\right]\right\}}$$

$$(10)$$

式中: ω_y 和 k_y 分别表示航迹上的角频率和波数; d_y 为阵元间隔。式(10)经化简可以写成:

$$s_{\mathrm{T}}(t, \overline{\mathbf{r}}', \overline{\mathbf{r}}_{0})_{\mathrm{FDA}} = \exp\left[j\omega_{\mathrm{c}}(t-t_{0})\right] \cdot \exp\left(-j\overline{\mathbf{k}}_{\mathrm{c}}\overline{\mathbf{r}}'\right) \cdot \exp\left[-j\left(\frac{N-1}{2}\right)k_{0}d_{y}k_{y}\right] \cdot \frac{\sin\left\{\frac{N}{2}\left[\Delta\omega_{y}(t-t_{0})-k_{0}d_{y}k_{y}-\Delta k_{y}\hat{\mathbf{r}}_{0}\overline{\mathbf{r}}'\right]\right\}}{\sin\left\{\frac{1}{2}\left[\Delta\omega_{y}(t-t_{0})-k_{0}d_{y}k_{y}-\Delta k_{y}\hat{\mathbf{r}}_{0}\overline{\mathbf{r}}'\right]\right\}}$$
(11)

式中: $\omega_c = \omega_0 + \frac{N-1}{2} \Delta \omega_y$, 表示阵列中心频率; $k_c = \frac{\omega_c}{c}$, c 为光速, $\bar{k}_c = k_c \hat{r}_0$ 表示波数。现仅对场景中心目标点进行分析, **r** 矢量可看作 0,则由式(11)可得,当满足:

$$\frac{1}{2} \left[\Delta \omega_{y}(t-t_{0}) - k_{0} d_{y} k_{y} \right] = \pi u , \quad u = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$$
(12)

时,信号幅度值最大,当 u 值取 0 时,从式(12)中解得:

$$t_{\rm app} = t_0 + \Delta t_0, \quad \Delta t_0 = \frac{d_y \cos \psi_0 \sin \theta_0}{\lambda_0 \Delta f_y}$$
(13)

式中: λ_0 为波长; t_{app} 为总传播时间。从式(13)可以看出,信号传播最大值时间由2部分组成,除了式(9)中的实际传播时间 t_0 外,还有一个与目标位置及频率增量 Δf_y 有关的分量 Δt_0 ,使得传播时间总和大于或者小于实际传播时间,此处称总传播时间为虚拟辐射时间,因此总传播距离实际上也会大于或者小于实际平台至场景中心的距离 \overline{r}_0 ,如式(14)所示:

$$r_{\rm app} = r_0 + \Delta r_0, \quad \Delta r_0 = c \Delta t_0 = \left(d_y f_0 \cos \psi_0 \sin \theta_0 \right) / \Delta f_y \tag{14}$$

式中: *r*_{app}为虚拟视距,它与实际传播 *r*₀间存在一距离差分量 Δ*r*₀,由虚拟视距和虚拟辐射时间,可以将由平台实际位置发射的 FDA 信号波形等效成在离场景中心距离为虚拟视距处的某点发出普通阵列波形,此点即可称之为虚拟辐射源,由式(14)可得,Δ*f*_y越大,虚拟辐射源与实际辐射源相隔越近。根据 1.2 中分析,求 ∂x / ∂y 可获得信号传播方向,则将式(13)求偏导可得:

$$\partial x/\partial y = -\left\{ (Y_{\rm c} - R_{\rm y}) + \frac{d_{\rm y} f_0}{\Delta f_{\rm y}} \left[1 + \left(\frac{Y_{\rm c} - R_{\rm y}}{r_0}\right)^2 \right] \right\} / \left\{ (X_{\rm c} - R_{\rm x}) + \frac{d_{\rm y} f_0}{\Delta f_{\rm y}} \left[\frac{(Y_{\rm c} - R_{\rm y})}{r_0} \frac{(X_{\rm c} - R_{\rm x})}{r_0} \right] \right\}$$
(15)

式(15)即为虚拟辐射角斜率,根据式(1)、式(2)和式(5),可由式(15)求得虚拟辐射角:

$$\theta_{\rm app} = -\arctan\left\{ \left[\left(Y_{\rm c} - R_{\rm y}\right) + \frac{d_{\rm y}f_0}{\Delta f_{\rm y}} \left(1 + k_{\rm y}^2\right) \right] / \left[\left(X_{\rm c} - R_{\rm x}\right) + \frac{d_{\rm y}f_0}{\Delta f_{\rm y}} \left(k_{\rm x}k_{\rm y}\right) \right] \right\}$$
(16)

θ_{app} 与频率增量 Δf_y 成反比, 当 Δf_y 越大, 虚拟辐射角越小, 同时式(13)和式(14)中的虚拟辐射时间和虚拟视距也越小, 虚拟辐射源位置和实际辐射源位置越近; 反之 Δf_y 越小, 则虚拟辐射源和实际辐射源相隔越远。

综上所述,在聚束 SAR 系统中, 雷达平台(频率分集阵列)在实际位置处的发射信号可以等效成普通阵列(如相控阵)在虚拟辐射源处所发射的信号,并且由式(14)~式(16)可知, 频率增量越小时, 虚拟辐射源和实际平台位置相隔越远,因此对目标的等效积累时间越长,方位向积累角越大,这样可以有效提高成像的方位向分辨力。

3 仿真结果

利用 MATLAB 对虚拟辐射源位置进行仿真验证,设雷达平台航迹与目标场景中心垂直距离为 10 km,聚束 SAR 平台与场景中心的水平距离分别为 $10\sqrt{3}$ km, $10/\sqrt{3}$ km, $10/\sqrt{3}$ km, 针对这 3 种情况分别分析当 Δf_y 变化时虚拟辐射源与实际辐射源位置关系。

某一目标点处的信号可以表示为:



通过图 2 可见,当频率增量一定时,雷达平台与场景中心的距离越大,则虚拟辐射源与实际辐射源相隔越远,反之则越近,同时,针对固定的平台—场景中心距离,当频率增量越小时,虚拟辐射源与实际辐射源相隔越远,在图 2(c)中,平台—场景距离为 $10/\sqrt{3}$ km,当 Δf_y 为 10 kHz 时,虚拟辐射源和实际辐射源距离可达 10 km,而当 Δf_y 增大时,距离差减小,虚拟辐射源与实际辐射源越来越接近。可见在不同的辐射源处选取合适的 Δf_y 值,可以得到一个与实际雷达平台相距很远的虚拟辐射源。

在上述研究基础上利用 MATLAB 对正侧视聚束模式 SAR 成像进行仿真实验,首先对于传统积累方式,参数 设置如下:平台合成孔径长度为1609 m;场景中心与平台垂直距离为40250 m,目标场景由5个点目标组成, 除场景中心外,在其上下左右相距0.7 m 处各有一点目标;天线阵列为9×1均匀线阵;阵元发射信号为线性调频 脉冲,带宽为400 MHz,脉冲宽度为0.256 μs,载频 f₀为1GHz,各阵元间无频率增量。成像结果见图3。当阵 列中引入频率增量,并且该频率增量自适应变化,使得平台波束在航迹上各数据采集点处始终指向目标场景,则 如式(14)所示,每个采集点对应于一个虚拟辐射源,由式(15)和式(16)分析可得该虚拟辐射源将合成孔径由原来的 1609 m 变为3218 m,实现了孔径扩展,因此如图4所示,引入频率增量后成像方位向分辨力由原来的0.38 m 提高至0.19 m。



4 结论

本文对基于频率分集阵列的聚束 SAR 信号进行分析,推导出虚拟辐射源概念,从实际辐射源发射的 FDA 信号可以等效成从虚拟辐射源发射的常规信号,并且虚拟辐射源与实际辐射源间隔可以通过频率增量进行控制,在选取参数合理时,两者可相隔十几公里之远,这对于提高雷达平台的隐身性能和进行电子欺骗具有重要意义。此外,仿真结果证实,频率分集阵列在聚束 SAR 成像系统中可以有效提高方位向分辨率。针对频率分集阵列在实际应用中的阵元信号分离和收发方式等问题有待进一步研究。

参考文献:

[1] Brookner Eli. Phased-Array Radars[J]. Scientific American, 1985,252(2):94–102.