

基于正弦频偏的多载波频控阵的设计与实现

武依冰 马秀荣

(天津理工大学电气电子工程学院 天津 300384)

(光电器件与通信技术教育部工程研究中心 天津 300384)

摘要 针对常规频控阵(FDA)采用线性频偏增量产生的“S”形波束图在角度和距离上耦合和分辨率不够高的问题,提出一种新型频控阵——基于正弦频偏的多载波 FDA。设计并建立了布阵模型,分析了信号模型,推导了在远场形成的发射波束方向图。通过 MATLAB 对该频控阵的仿真,结果显示该频控阵能够在目标位置处形成点状波束,在发射能量聚焦性能和阵列分辨率性能上均优于现有的对数频控阵。

关键词 频控阵 正弦频偏 多载波 对称结构 耦合 分辨率

中图分类号 TP3

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2021.02.013

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MULTI-CARRIER FREQUENCY ARRAY BASED ON SINUSOIDAL FREQUENCY OFFSET

Wu Yibing Ma Xiurong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Engineering Research Center of Optoelectronic Devices and Communication Technology, Ministry of Education, Tianjin 300384, China)

Abstract Aiming at the problem that the "S" beam pattern produced by linear frequency offset increment in conventional frequency array (FDA) is not coupled in angle and distance and has a high resolution, a new type of frequency array, multi-carrier FDA based on sinusoidal frequency offset, is proposed. The array model was designed and established. The signal model was analyzed and the beam pattern formed in the far field was deduced. Through the simulation of the array by MATLAB, the results show that the array can form a point beam at the target position, which is superior to the existing logarithmic frequency array in the performance of transmitting energy focusing and array resolution.

Keywords FDA Sinusoidal frequency offset Multi-carrier Symmetrical structure Coupling Resolving power

0 引言

相控阵通过改变天线阵元的相位激励实现了空间波束的扫描,从而检测感兴趣方向上的目标,并抑制来自其他方向的强旁瓣干扰^[1-2]。虽然相控阵有许多优点,但在实际应用中还存在缺点,主要是制造成本高,发送定向的波束需要更多的天线元件和电子移相器,这是相当昂贵的^[3]。另外,相控阵雷达在所有距离内以固定角度产生最大功率,因此,利用相控阵抑制距离相关杂波和定位多个方向相同但距离不同的目标是

非常困难的。

常规 FDA 不同于相控阵,它在整个阵列中的信号频率上分别附加一个很小的频率偏移,可以产生一个距离、角度与时间相关的波束图。这种模式提供了距离维上的分辨能力,具备了距离依赖干扰的抑制能力,近年来持续受到广泛关注与研究^[4-6]。FDA 系统最初由文献[7-8]提出,随后 FDA 的波束特性得到了广泛研究:文献[9]研究了 FDA 关于距离、角度和时间相关的波束图;文献[10-11]对小频偏情况下 FDA 的波束特性进行了研究;文献[12-13]则对大频偏情况下 FDA 的波束特性进行了研究。研究表明:小的频

率偏移被用来产生与距离相关的波束图,而大的频率偏移有助于从目标获得独立的回波。由于其距离依赖波束模式,FDA 提供了比相控阵更多的功能,如自动扫描、目标的距离角定位^[14]、向特定的距离角空间集中传输能量,从而抑制与距离相关的干扰^[15],提高接收到的信噪比(SNR)、信号与干扰加噪声比(SINR)^[16]等。

在常规 FDA 中,阵元间固定频率偏移被应用于均匀线性天线阵列。然而,常规 FDA 产生的波束图在距离上是周期性的^[9],即在多个距离下达到最大值。由于这种波束具有多重极大值,位于极大值任何一个位置的潜在干扰都可能进入雷达场景,并恶化由此产生的信噪比(SNR)。为了改善 SNR 并实现 FDA 距离角度相关波束图的解耦,最好的方法是形成点形波束图,而不是“S”形波束图。文献[17]尝试为 FDA 雷达使用非均匀线性阵列,在这种阵列中,该布阵方式的主要问题是不能实时更改载波频率和频率偏移,因为这需要机械地重新定位发射天线阵元,而这在现实中不易实现。文献[18-19]提出和分析了均匀间隔的基于对数频偏的 FDA,该方法打破了常规 FDA 的周期性,进一步抑制距离依赖性干扰,从而提高 SNR 和可检测性。但在距离和角度两个维度上,尤其是在距离维度上,能量不够集中,分辨率较差。

本文针对常规 FDA 采用线性频偏增量产生的“S”形波束图在角度和距离上耦合和分辨率不够高的问题,提出了一种新的波束合成方式。该方法同时采用单阵元发射多频信号^[20-21]、正弦函数频偏方式和对称结构;通过 MATLAB 进行仿真,得到在远场处的点状波束,打破了常规频控阵在距离和角度上的耦合;与现有的基于对数频偏的 FDA 相比,实现了能量的进一步聚焦,弱化了基于对数频偏 FDA 波束图上不规则的拖尾现象。在角度维度上,基于正弦频偏的多载波 FDA 主瓣 3 dB 宽度比基于对数频偏的 FDA 窄了 7.7°;在距离维度上,基于正弦频偏的多载波 FDA 主瓣 3 dB 宽度比基于对数频偏的 FDA 窄了 8.22×10^4 m,进一步印证了该频控阵在距离和角度上具有更好的分辨率。

1 阵列天线

1.1 相控阵

相控阵按照均匀线阵的方式布阵,与普通线阵不同的是,每个天线内都有一个移相器,可以实现角度上的扫描。设目标方位为 (R', θ') , 经过目标方位匹配加权后的波束方向图表达式为^[22]:

$$B(t, \theta) = \left| \frac{\sin(M\varphi'/2)}{\sin(\varphi'/2)} \right|^2 \quad (1)$$

$$\varphi' = d(\sin\theta - \sin\theta')k$$

式中: M 为天线个数; k 为天线阵元发射信号的波数; d 为天线之间的间距; 为发射信号的半波长。

由式(1)可以看出,相控阵的波束方向图仅仅是角度的函数,不具备距离、时间依赖性。

1.2 常规频控阵

常规 FDA 与相控阵不同的是每两个相邻天线阵元之间频率相差一个固定频偏。设目标方位为 (R', θ') , 经过目标方位匹配加权后的波束方向图表达式为^[23]:

$$B(t, R_0, \theta) = \left| \frac{\sin(M\varphi'/2)}{\sin(\varphi'/2)} \right|^2 \quad (2)$$

$$\varphi' = 2\pi\Delta f \left(t - \frac{R_0 - R'}{c} \right) + d(\sin\theta - \sin\theta')k_0$$

式中: Δf 为频偏; R_0 为最左侧天线阵元到目标的距离; k_0 为最左侧天线阵元发射信号的波数; M 为天线个数; c 为光速。

根据式(2)可以看出,常规 FDA 的波束方向图对距离、角度、时间具有依赖性,通过控制阵列的相关参数可以实现波束的灵活控制。但是,常规 FDA 在距离、角度、时间上均具有周期性。

1.3 基于对数频偏的频控阵

基于对数频偏的 FDA 与常规 FDA 不同的是天线阵元间的频偏为一个对数增长量,经过目标方位匹配加权后的波束方向图表达式为^[18]:

$$B(t, R_0, \theta) = \left| \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\varphi'} \right|^2 \quad (3)$$

$$\varphi' = 2\pi\Delta f \lg(m+1) \left(t - \frac{R_0 - R'}{c} \right) + jmd(\sin\theta - \sin\theta')k_0$$

从式(3)可以看出,基于对数频偏的 FDA 的波束方向图仍是距离、角度、时间函数,却提供了一种非周期波束模式。

2 基于正弦频偏的多载波频控阵

2.1 布阵方式描述

基于正弦频偏的频控阵以均匀间距 d 放置相同天线阵元,阵列以脉冲重复间隔发送持续时间脉冲。阵元之间的间隔为对称中心天线单元发射信号的半波长。 A 为远场观测点, R_m 为第 m 个阵元到观测点的距离,以中心阵元为参照点,即方位角为 θ , 该布阵方式

如图 1 所示。

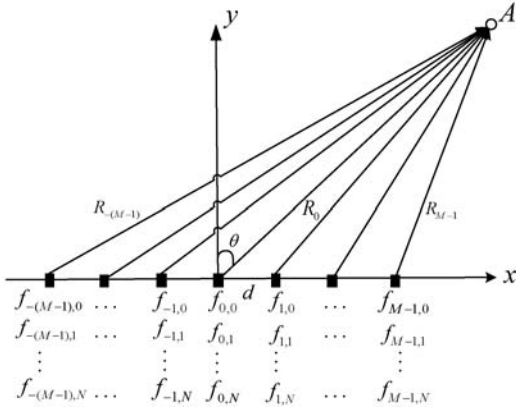


图 1 基于正弦频偏的多载波 FDA 布阵方式

提出的基于正弦频偏的多载波 FDA 与常规 FDA 有三点不同之处:(1) 采用对称结构,阵列对称部分的发射频率相同;(2) 该 FDA 每个阵元同时传输多个不同频率的载波信号,而不是单个载波信号;(3) 该 FDA 采用的频率偏移为正弦函数频偏。

为了实现与距离相关的波束形成,令频偏参数保持较小,并且每个天线阵元传输的波形是相同的。本文假设所有天线阵元的辐射模式相同,尽管发射频率不同,此外,还假设阵元之间没有相互耦合。

根据图 1,第 m 个发射天线中第 n 个频率分量的辐射频率可表示为:

$$f_{m,n} = f_0 + \sin(|m|n) \Delta f$$

$$m = -(M-1), -(M-2), \dots, 0, 1, \dots, M-1$$

$$n = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中: f_0 是最阵列对称中心阵元发射信号的频率。

2.2 信号模型

考虑到上述基于正弦频偏的多载波 FDA 的布阵结构、频偏形式和多载波方式,第 m 个发射天线中第 n 个频率分量发射的信号是:

$$x_{m,n}(t) = a_{m,n} e^{j2\pi f_{m,n} t} \quad 0 < t < T$$

式中: $a_{m,n}$ 是与发送信号相关的权重系数。在远场的某一点 A 观测到的总信号为:

$$x(t, R_m, \theta) = \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} x_{m,n} \left(t - \frac{R_m}{c} \right) \quad (5)$$

对于式(5)采用远场近似,即 $R_m = R_0 - m d \sin \theta$,并将式(4)代入式(5),得:

$$x(t, R_0, \theta) = e^{j2\pi f_0(t - R_0/c)} \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} e^{j\varphi}$$

$$\varphi = 2\pi \Delta f \sin(|m|n) \left(t - \frac{R_0}{c} \right) +$$

$$2\pi (f_0 + \sin(|m|n) \Delta f) \frac{m d \sin \theta}{c}$$

假设 $f_0 \gg \sin(|m|n) \Delta f$, 得到远场观测点 A 的总信号:

$$x(t, R_0, \theta) = e^{j2\pi f_0(t - R_0/c)} \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} e^{j\varphi} \quad (6)$$

$$\varphi = 2\pi \sin(|m|n) \Delta f \left(t - \frac{R_0}{c} \right) + 2\pi f_0 \frac{m d \sin \theta}{c}$$

2.3 波束合成

根据式(6),基于正弦频偏的多载波频控阵的阵因子为:

$$AF(t, R_0, \theta) = \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} e^{j\varphi}$$

它们的幅度平方称为发射波束方向图,因此波束方向图表达式为:

$$|B(t, R_0, \theta)| = |AF(t, R_0, \theta)|^2$$

从上述表达式可见,波束图的最大值 $t=0, R_0=0, \theta=0$ 时,为了在预期的目标位置 (R', θ') 处实现最大转向,权重系数 $a_{m,n}$ 应该配为:

$$a_{m,n} = e^{j2\pi \left\{ \frac{\sin(|m|n+1)\Delta R'}{c} - \frac{f_0 m d \sin \theta'}{c} \right\}}$$

因此,转向波束图为:

$$|B(t, R_0, \theta)| = \left| \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} e^{j\varphi'} \right|^2$$

$$\varphi' = 2\pi \sin(|m|n) \Delta f \left[t - \frac{(R_0 - R')}{c} \right] + 2\pi f_0 \frac{m d (\sin \theta - \sin \theta')}{c}$$

3 仿真结果和比较

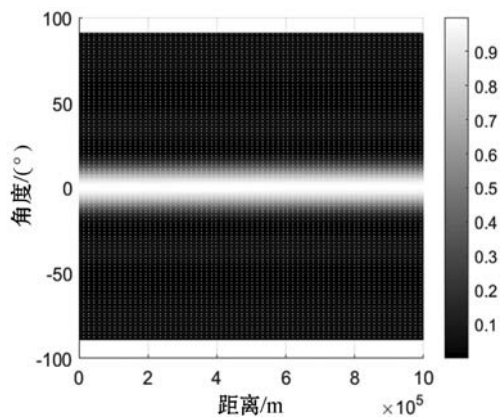
本节根据表 1 的仿真参数对相控阵、常规 FDA 和基于对数频偏的 FDA 进行了仿真,结果如图 2 所示;根据表 2 所示的仿真参数对本文提出的基于正弦频偏的多载波 FDA 的波束方向图进行了仿真,结果如图 3-图 5 所示。并对其进行了分析、对比和讨论。

表 1 天线阵列仿真参数表

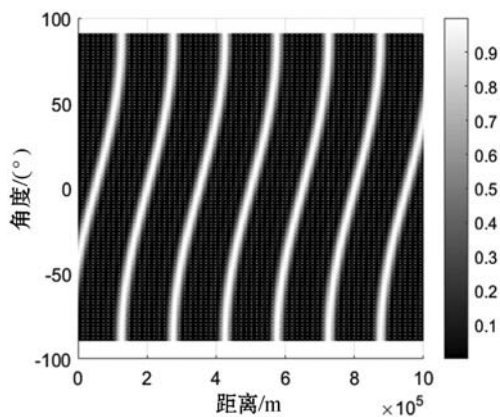
阵类型	M	f/GHz	$\Delta f/\text{kHz}$
相控阵	5	10	0
FDA	5	10	2
基于对数的 FDA	5	10	2

表 2 基于正弦频偏的多载波 FDA 仿真参数表

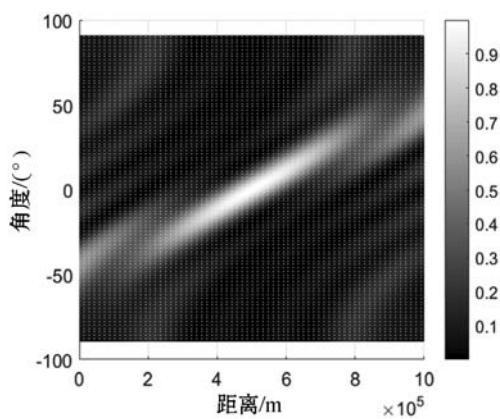
参数	参数值	参数	参数值
M	5	f_0	10 GHz
N	5	Δf	2 kHz



(a) 相控阵波束图



(b) 常规 FDA 波束图



(c) 基于对数频偏的 FDA 波束图

图 2 天线阵列波束图

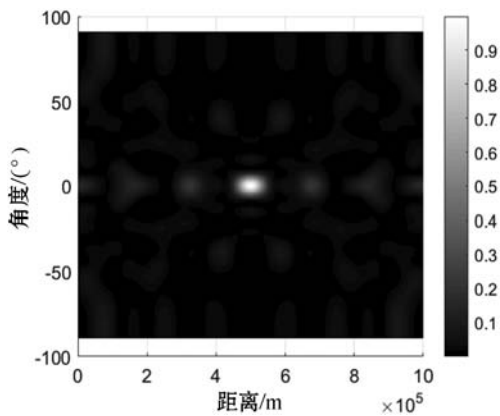
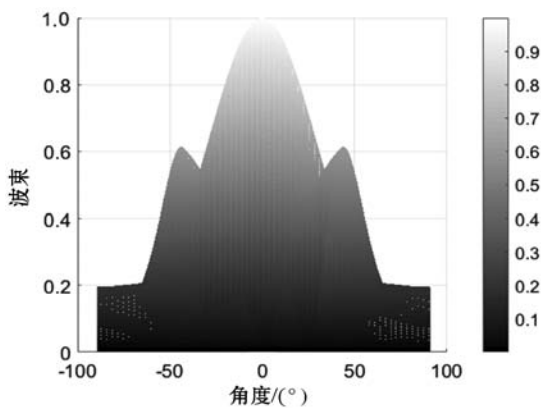
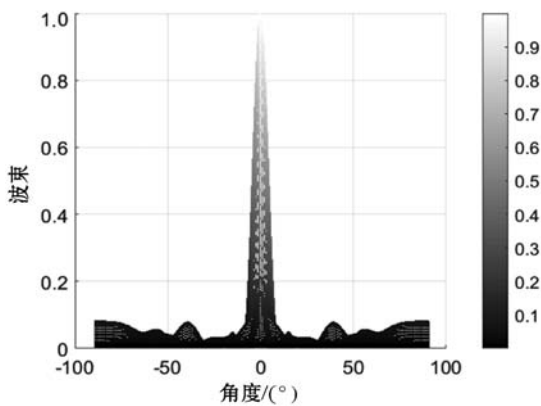


图 3 基于正弦频偏的多载波 FDA 波束图

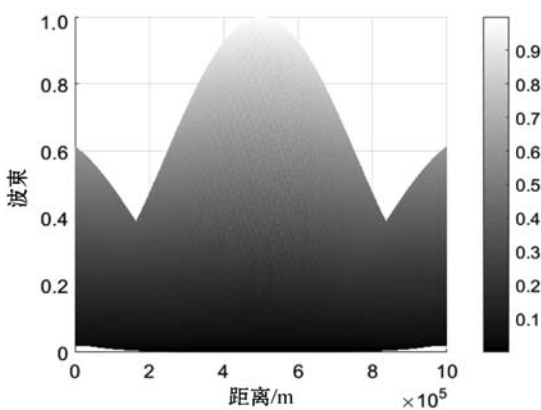


(a) 基于对数频偏的 FDA

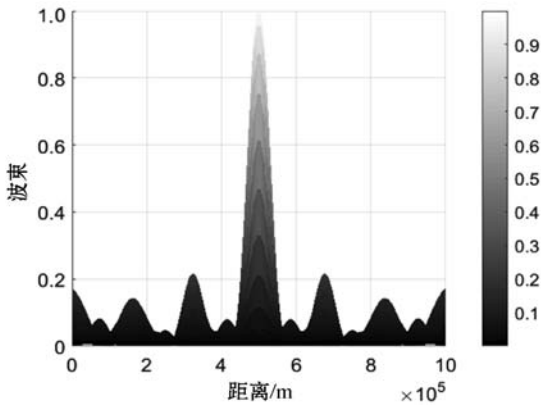


(b) 基于正弦频偏的多载波 FDA

图 4 角度维波束图



(a) 基于对数频偏的 FDA



(b) 基于正弦频偏的多载波 FDA

图 5 距离维波束图

在 $A(0^\circ, 5 \times 10^5 \text{ m})$ 处放置目标,图 2(a) 所示的相控阵波束图是角度选择性的,而不是距离选择性的。因此,它不能抑制与距离相关的干扰。而在常规的 FDA 波束图(如图 2(b) 所示)是有选择的,因为它们可以抑制由于距离依赖产生的干扰。图 2(b) 也显示了沿距离维度的周期性,位于多个最大值中的任意一些不需要的非目标物体将会干扰目标的返回。相反,在基于对数频偏的 FDA 中(如图 2(c) 所示),波束方向图在目标位置显示最大值,在空间中没有其他最大值出现。非均匀的阵元间频率消除了波束图中的周期性,从而确保仅在所需位置返回最大值。图 3 为基于正弦频偏的多载波 FDA 所形成的点状波束图。该频控阵在目标位置显示最大值,打破了波束的周期性,抑制了距离依赖性干扰。

将图 3 与图 2(c) 作比较。可以注意到,两种方案在目标位置的表现都达到了预期的最大值,但所提出的基于正弦频偏的多载波 FDA 在三个方面优于基于对数的 FDA:

1) 基于正弦频偏的多载波 FDA 生成了一个更集中的点状波束图,而基于对数的 FDA 具有不规则的波束,且具有拖尾现象;

2) 基于正弦频偏的多载波 FDA 在目标区域具有更窄的主瓣宽度,因此在分辨率上的性能会更好;

3) 基于正弦频偏的多载波 FDA 比对数 FDA 可以将更多的发射能量集中到目标上。

更明显的比较如图 4、图 5 所示,其分别对比了两者在目标位置处,距离维和角度维上的方向图投影。

通过图 4(a) 和(b) 的对比显示:基于正弦频偏的 FDA 能量集中在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 和 $[4.5 \times 10^5, 5.5 \times 10^5] \text{ m}$, 而基于对数频偏的 FDA 能量集中在 $[-50^\circ, 50^\circ]$ 和 $[2 \times 10^5, 8 \times 10^5] \text{ m}$ 。

在角度维度上,基于正弦频偏的多载波 FDA 主瓣 3 dB 宽度为 9.3° , 比基于对数频偏的 FDA 窄了 7.7° 。通过图 5(a) 与(b) 的对比显示:在距离维度上,基于正弦频偏的多载波 FDA 主瓣 3 dB 宽度为 $6.58 \times 10^4 \text{ m}$, 比基于对数频偏的 FDA 窄了 $8.22 \times 10^4 \text{ m}$ 。

综上可得:基于正弦频偏的多载波 FDA 能量分布范围更窄;并且基于正弦频偏的多载波 FDA 无论在距离维度上还是角度维度上都比基于对数的 FDA 产生了更窄的主瓣。这再次验证了本文提出的频控阵发射波束能量更加集中,具有更好的距离和角度分辨率,从而可以实现对空间扫描光束更精确的控制。

4 结 语

本文提出了一种新型频控阵——基于正弦频偏的多载波 FDA,设计并建立了布阵模型,分析了信号模型,推导了在远场形成的发射波束方向图。结果表明,基于正弦频偏的多载波 FDA 在远场形成了点状波束,打破了目标区域上在距离和角度上的耦合性。与基于对数频偏的 FDA 相比两种方法都在预先设定的目标处形成波束,但是基于正弦频偏的多载波 FDA 能够形成点状波束,具有更加明显的优势:目标区域中在距离和角度维上有更窄的主瓣宽度,从而展现出很好的分辨率,形成能量更加集中的形状规则的波束。未来工作将继续在基于正弦频偏的多载波 FDA 上研究其接收波束形成,分析其 SINR。

参 考 文 献

- [1] Ivashina M V, Iupikov O, Maaskant R, et al. An optimal beamforming strategy for wide-field surveys with phased-array-fed reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(6): 1864 - 1875.
- [2] Keizer W P M N. Low sidelobe phased array pattern synthesis with compensation for errors due to quantized tapering [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(12): 4520 - 4524.
- [3] Brookner E. Phased array radars-past, present and future [C]//2002 International Radar Conference. IET, 2002: 104 - 113.
- [4] Wang Y X, Huang G C, Li W. Transmit beam pattern design in range and angle domains for MIMO frequency diverse array radar[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16: 1003 - 1006.
- [5] Qin S, Zhang Y D, Amin M G, et al. Frequency diverse coprime arrays with coprime frequency offsets for multitarget localization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(2): 321 - 335.
- [6] Liao Y, Liu Q H. Modified chirp scaling algorithm for circular trace scanning synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 7081 - 7091.
- [7] Antonik P, Wicks M C, Griffiths H D, et al. Frequency diverse array radars [C]//2006 IEEE Conference on Radar. IEEE, 2006: 3.
- [8] Wicks M C, Antonik P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude and phase: US 7319427[P]. 2008 - 01 - 15.

- [9] Basit A, Khan W, Khan S, et al. Development of frequency diverse array radar technology: a review[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2017, 12(2): 165 - 175.
- [10] Basit A, Qureshi I M, Khan W, et al. Beam pattern synthesis for an FDA radar with hamming window-based nonuniform frequency offset[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2283 - 2286.
- [11] Wang W Q, So H C, Farina A. An overview on time/frequency modulated array processing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(2): 228 - 246.
- [12] Zhang J J, Papandreou-Suppappola A. MIMO radar with frequency diversity[C]//2009 International Waveform Diversity and Design Conference. IEEE, 2009: 208 - 212.
- [13] Shanbhag K V, Deb D, Kulkarni M. MIMO radar with spatial-frequency diversity for improved detection performance [C]//2010 International Conference on Communication Control and Computing Technologies. IEEE, 2010: 66 - 70.
- [14] Sammartino P F, Baker C J, Griffiths H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 201 - 222.
- [15] Tan M, Wang C Y, Li Z H, et al. Stepped frequency pulse frequency diverse array radar for target localization in angle and range domains[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2018: 8962048.
- [16] Chen X L, Chen B X, Guan J, et al. Space-range-Doppler focus-based low-observable moving target detection using frequency diverse array MIMO radar[J]. IEEE Access, 2018, 6: 43892 - 43904.
- [17] Liao Y, Wang W Q, Zheng Z. Frequency diverse array beam pattern synthesis using symmetrical logarithmic frequency offsets for target indication[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(5): 3505 - 3509.
- [18] Mahmood M, Mir H. Frequency diverse array beamforming using nonuniform logarithmic frequency increments [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(10): 1817 - 1821.
- [19] 蒋燕妮, 陈泽宗, 赵晨. 基于固定与对数频偏的频率分集阵列雷达波束特性研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(10): 25 - 29.
- [20] 戴军. 基于 FDA 的发射接收波束形成理论研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [21] 熊杰. 频控阵发射波束形成及其应用方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [22] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [23] 陈浩, 韩宏川, 李荣锋, 等. 频率分集阵列及其研究进展[J]. 现代防御技术, 2019, 47(1): 63 - 74.
- (上接第 12 页)
- [7] 苑娜, 郭峰, 张建光. 基于全生命周期的历史风貌建筑数字保护研究——以段祺瑞旧居修缮为例[J]. 重庆建筑, 2018, 17(7): 10 - 14.
- [8] Kabassi K. Fast, low cost and safe methodology for the assessment of the state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: The case study of Santa Maria in Portonovo (Italy) [J]. Journal of Cultural Heritage, 2017, 24: 175 - 183.
- [9] Xiao Y H, Zhan Q M, Pang Q C. 3D data acquisition by terrestrial laser scanning for protection of historical buildings [C]//2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. IEEE, 2007: 5971 - 5974.
- [10] Chang Y M, Lu N H, Wu T C. Application of 3D laser scanning technology in historical building preservation: a case study of a Chinese temple[J]. Optical Methods for Arts and Archaeology, 2005, 5857: 585711.
- [11] 周晓敏, 孟晓林, 张雪萍, 等. 倾斜摄影测量的城市真三维模型构建方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 159 - 163.
- [12] Dore C, Murphy M. Integration of historic building information modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites[C]//2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia. IEEE, 2012: 369 - 376.
- [13] 李微, 肖金亮. 城市总体规划和控制性详细规划中的文物保护应对策略初探[J]. 城市环境设计, 2006(4): 50 - 53.
- [14] 师磊. “多规合一”趋势下的文物行政工作对策[N]. 中国文物报, 2018 - 05 - 11(3).
- [15] 干立超, 黄莉莉. 从文物保护规划编制要求修订研究“多规合一”的新趋向[J]. 建筑与文化, 2018(9): 67 - 68.
- [16] 张平. 2D GIS 和 3D GIS 的城市规划辅助决策系统[J]. 测绘通报, 2018(9): 130 - 134.
- [17] 尹继鑫, 贾国龙, 郭德福. 西宁市三维辅助规划审批系统应用浅析[J]. 城市勘测, 2017(5): 106 - 109.
- [18] 徐瑞. 基于 WebGL 的三维 GIS 在城市规划中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [19] 王德生. 基于 HTML5 和 WebGL 的三维 WebGIS 系统构建及应用[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- [20] 艾丛. 基于 WebGL 的倾斜摄影三维模型可视化方案设计与实现[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [21] Feng L, Wang C L, Li C R, et al. A research for 3D WebGIS based on WebGL[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology. IEEE, 2011: 348 - 351.
- [22] 周达, 李明, 关昆, 等. 基于 WebGL 的三维 GIS 应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017(12): 139 - 140.