2017年10月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2017)05-0707-04

近场雷达成像非均匀稀疏阵设计

赵 磊 ^{a,b}, 黄 昆 ^{a,b}, 郝 鑫 ^{a,b}, 赵宇姣 ^{a,b}, 葛桐羽 ^b, 刘 杰 ^{a,b} (中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 阵列设计作为多输入多输出(MIMO)雷达成像系统中的一项关键技术直接影响系统成 像性能。为了解决阵元数目、结构与成像质量的关系问题,研究了近场MIMO收发稀疏阵的点扩展 函数,研究了合成阵列中栅瓣的位置,探讨了基于等效阵列概念的MIMO阵列设计方法,优化了基 于远场条件设计的稀疏阵,并讨论了近场效应对成像结果的影响。仿真结果表明:优化后的阵列 在120~150 GHz栅瓣水平可以抑制到-50 dB。

关键词:近场雷达成像;阵列设计;稀疏阵;栅瓣 中图分类号:TN957.51 **文献标志码:**A **doi**:10.11805/TKYDA201705.0707

Non-uniform sparse array design in near field radar imaging

ZHAO Lei^{a,b}, HUANG Kun^{a,b}, HAO Xin^{a,b}, ZHAO Yujiao^{a,b}, GE Tongyu^b, LIU Jie^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) radar imaging systems, the configuration of antenna array, as one of the key techniques, has great effects on image quality. Based on the imaging model of MIMO radar, in order to compromise the number of antennas and the performance of the array, the sparse array design method taking advantage of the equivalent virtual array concept is discussed, and the designed structure of the sparse array based on far field is optimized. Simulation results show that the grading lobes of the proposed array are lower than -50 dB in 120-150 GHz.

Keywords: near field imaging; array design; sparse array; grading lobes

近年来,随着固态器件和射频集成电路的发展,毫米波成像系统日益受到广泛关注。毫米波具有高空间分辨 能力、穿透性和非电离性等多方面的优点,特别适用于近距离微小目标的探测应用,如:安检成像、医学成像、 非损耗检测、探地/穿墙雷达等^[1-3]。在近场成像应用中,为获得较高的方位分辨力,需使用较大尺寸的阵列以形 成大观测视角,但在空间采样定理的限制下,所需的阵元数目极大,实际中难以实现^[1]。如何在保证高空间分辨 力的同时降低阵元数量是该类系统亟待解决的关键问题。部分毫米波成像系统采用机械扫描方式降低阵列成本, 但该方法增加了数据采集时间^[2]。近年来出现的稀疏多输入多输出(MIMO)雷达阵列体制兼具高分辨能力和实时 性,同时降低了阵列成本,为近场毫米波成像提供了新的技术途径^[3]。

阵列设计是 MIMO 雷达近场成像中的一个关键技术,直接影响成像系统性能和图像质量。基于等效阵列概 念进行 MIMO 阵列设计是远场应用中一种有效可行的方法,在远场条件下,等效 MIMO 阵列为发射阵列空间导 向矢量与接收阵列空间导向矢量的卷积^[4]。一些学者也已初步探讨了该方法在近场应用中的可行性。Yang^[5]基于 该方法进行了超宽带 MIMO 雷达阵列设计及成像研究,在 10~18 GHz 进行的成像实验结果证明了该设计方法的 有效性。Gumbmann^[3,6]和 Baccouche^[7]等基于等效阵列设计得到的 MIMO 线阵与合成孔径成像方式进行结合,提 出了 MIMO-SAR 三维成像算法,并在 75~90 GHz 进行了成像试验。Ahmed^[8]研究了二维稀疏阵成像性能。为了 进一步降低栅瓣水平,本文提出非均匀稀疏阵列,由于栅瓣主要是接收天线阵列引起,通过分析接收天线阵列结 构,得到其栅瓣的位置,再优化其结构,使得栅瓣水平进一步降低。

1 雷达成像模型

首先,构建 MIMO 雷达信号模型如下,假设线性散射模型,收发天线都为全向天线,并且忽略电磁波在空间的衰减,在这种情况下,接收到的信号可表示为:

$$s(r_{\rm T}, r_{\rm R}, f) = \int_{U} g(r_0) h(r_{\rm T}, r_{\rm R}, r_0, f) dr_0$$
(1)

式中: $r_{\rm T}$ 和 $r_{\rm R}$ 为发射天线到目标以及目标到接收天线的距离;f为载频中心频率; $g(r_0)$ 为目标的散射函数; r_0 为 目标位置; $h(r_{\rm T}, r_{\rm R}, r_0, f)$ 为电磁波从发射天线经过目标反射,再到接收天线的相位变化,即 $h(r_{\rm T}, r_{\rm R}, r_0, f) = e^{-jk(R_{\rm T0}+R_{\rm R0})}$; $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ 为波束数目;c为光速,为了方便描述,并不失一般性,进一步假设水平方向 $z_{\rm T} = z_{\rm R} = 0$,发射天线 到目标的距离以及目标到接收天线的距离可用以下公式计算:

$$R_{\rm T0} = |r_{\rm T} - r_0| = \sqrt{(x_{\rm T} - x_0)^2 + (y_{\rm T} - y_0)^2 + z_0^2}$$
(2)

$$R_{\rm R0} = |r_{\rm R} - r_0| = \sqrt{(x_{\rm R} - x_0)^2 + (y_{\rm R} - y_0)^2 + z_0^2}$$
(3)

所以,基于匹配滤波器的后向投影算法可重建目标图像为:

$$T(r) = \sum_{f} \sum_{N_{\rm T}} \sum_{N_{\rm R}} s(r_{{\rm T},n}, r_{{\rm R},m}, k) h^*(r_{{\rm T},n}, r_{{\rm R},m}, r_0, f)$$
(4)

式中: N_T为发射天线数量; N_R为接收天线数量; r_{T,n}为第 n 个发射天线的位置; r_{R,m}为第 m 个接收天线的位置。

2 近场特性分析

假设长度为 L 的接收阵列,中心位置为 z_c,见图 1,目标位置为 z₀,假设天线为全相天线,并忽略幅度信息,接收到的信号 s(z)为:

$$s(z) = \left[rect\left(\frac{z-z_c}{L}\right) e^{jkR} \right]_{n=-\infty}^{\infty} \delta(z-n\Delta z)$$
(5)

式中: $R = \sqrt{(z - z_0)^2 + X_0^2}$ 。所以在空时域,接收信号可表示为:

$$S(k_z) \approx \left[rect\left(\frac{k_z - k_{z0}}{K_{z0}}\right) e^{j(k_x X_0 - k_z z_0)} \right] \sum_{n = -\infty}^{\infty} \delta\left(k_z - n\frac{2\pi}{\Delta z}\right)$$
(6)

式中: $K_{z0} = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$ 为带宽; $k_{z0} = k \sin \theta_2 + \frac{K_{z0}}{2}$ 为中心频率; k_z 为在空时域对应值; $k_x = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ 为传播条件。

阵列两端与目标的夹角为 $\theta_i = \arctan\left(\frac{z_0 - z_i}{X_0}\right)$, i = 1, 2。利用 空时域波束形成,可得到目标频谱为:



$$O(k_z) = S(k_z) \cdot e^{-jk_x X_0} \equiv C(k_z)$$
⁽⁷⁾

式(7)为距离阵列 X_0 的点目标的重建频谱。经过傅里叶变换即可得到点展布函数(Point Spread Function, PSF)和阵列特性。

3 阵列零点特性

阵列的零点特性主要取决于频谱 $O(k_z)$ 的无模糊区域,在式(7)中取 n = 0,得到 $O(k_z)|_{n=0} = rect \left(\frac{k_z - k_{z_0}}{K_{z_0}}\right) \cdot e^{-jk_z z_0}$, 然后对其做逆傅里叶变换,得到 PSF 的幅度为 $|o(z)|_{n=0}| = \sin c \left[\frac{K_{z_0}}{2}(z-z_0)\right]$ 。所以可以看出,第 1 个零点位置为 $z_{\text{NUS}} = \frac{2\pi}{K_{z_0}} + z_0 = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 - \sin \theta_2} + z_0$,很明显,零点的位置与目标的位置有关,即存在空变性,特别是当 θ_1 与 θ_2 的 值比较大时。这也是远场的阵列结构在近场条件下性能恶化的主要原因。

4 阵列结构设计

首先假设在远场条件下,有 40 个发射天线,16 个接收天线的阵列构成见图 2(a)。其中发射天线间距为 2 mm, 接收天线间距为 40 mm。利用点目标成像,图 2(b)给出了发射天线和阵列天线的 PSF。



图 4 等效阵列 PSF 特性

经过观察发现, 阵列 1 栅瓣主要是接收天线较高的栅瓣水平引起, 而栅瓣位置可以通过改变阵元间距进行改 变。由上述分析可知, 在目标距离不变的情况下, 缩小天线间距, 栅瓣位置相应地会向远离主瓣的方向移动。所 以, 通过缩小中间阵元的位置, 使得栅瓣位置向两侧移动, 从而接收阵列栅瓣位置与发射阵列零点位置能够更好 地重合; 由于发射天线阵列越远离中心点, 栅瓣水平越低, 所以收发天线合成后的阵列栅瓣水平也会降低。优化 后阵列收发天线阵列 PSF 见图 3。

图 4(a)和图 4(b)分别给出了优化前和优化后等效阵列的 PSF,可以看出优化前栅瓣水平在-30 dB,而优化后 栅瓣水平降低到了-50 dB。

5 结论

本文首先利用远场假设的条件设计了近场雷达成像的稀疏阵列,但由于在近场条件下该阵列有较高的栅瓣水 平,通过分析栅瓣产生的原因,优化了所设计阵列。仿真结果表明,优化后的阵列栅瓣水平得到进一步抑制,为 近场雷达生成高质量的图像奠定了很好的基础。

参考文献:

- ZHUGE Xiaodong, YAROVOY Alexander G. A sparse aperture MIMO-SAR-based UWB imaging system for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(1):509-518.
- [2] SHEEN D M, MCMAKIN D L, HALL T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2001,49(9):1581-1592.
- [3] GUMBMANN F,SCHMIDT L. Millimeter-wave imaging with optimized sparse periodic array for short-range applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(10):3629-3638.
- [4] SPRENG T,YUAN S,VALENTA V,et al. Wideband 120 GHz to 140 GHz MIMO radar:system design and imaging results[C]// Proceeding of the 45th European Microwave Conference. Paris,France:[s.n.], 2015:430-433.
- [5] YANG B,YAROVOY A,AUBRY P,et al. Experimental verification of 2D UWB MIMO antenna array for near-field imaging radar[C]// 2009 European Microwave Conference(EuMC). Rome,Italy:IEEE, 2009:97-100.
- [6] GUMBMANN F,SCHMIDT L. Design of sparse MIMO arrays for short range imaging applications[C]// 2010 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings(APMC). Yokohama,Japan:IEEE, 2010:1653-1656.
- [7] BACCOUCHE B,KEIL A,KAHL M,et al. A sparse array based sub-Terahertz imaging system for volume inspection[C]// Proceeding of the 45th European Microwave Conference. Paris,France:[s.n.], 2015:438-441.
- [8] AHMED S S, SCHIESSL A, SCHMIDT L P. A novel fully electronic active real-time imager based on a planar multistatic sparse array[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2011,59(12):3567-3576.

作者简介:



赵 磊(1988-),男,河南省上蔡县人,博 士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹成像 系统.email:zhaolei619@gmail.com.

赵宇姣(1990-),女,四川省攀枝花市人,硕士,研究 实习员,主要研究方向为太赫兹成像系统.

刘 杰(1981-),男,江西省全南县人,在读博士研究 生,主要研究方向为太赫兹成像系统及组件. **黄** 昆(1987-),男,兰州市人,硕士,助理研 究员,主要研究方向为太赫兹组件.

郝 鑫(1989-),女,成都市人,硕士,研究实 习员,主要研究方向为太赫兹通信信号处理.

葛桐羽(1992-),女,四川省绵阳市人,硕士, 主要研究方向为太赫兹成像系统.