2018年4月

文章编号: 2095-4980(2018)02-0249-05

基于时域调制反射阵列的波束赋形技术

王 洋, 郧铭清, 邵 羽, 林 峰, 舒 强

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 传统的反射阵利用相控器件与微带线实现波束赋形。为了降低相控成本与系统复杂度,提出基于时域调制阵列波束赋形技术。时域调制反射阵列是一种基于简单可重构反射单元的 反射阵,它利用控制可重构反射单元的开与关,达到控制阵列输出,实现旁瓣抑制、波束赋形等 功能。通过理论推导及仿真,结果表明,时域调制反射阵可以在不采用传统阵列中的相控器件及 馈电网络的前提下,采用最小方差无失真响应波束赋形方法与时间调制法,生成理想的方向图, 实现波束赋形功能。此特性将有利于推广波束赋形技术在毫米波频段反射阵的应用。

关键词:时域调制阵列;反射阵天线;波束赋形

中图分类号:TN911.71 文献标志码:A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0249

Beam forming technology based on time-domain modulated reflectarray

WANG Yang, YUN Mingqing, SHAO Yu, LIN Feng, SHU Qiang

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Conventional reflectarrays adopt phase shifters and microstrip lines to form the beam pattern. To reduce the cost of phase control and system complexity, a beamforming technology based on time-modulated reflectarrays is introduced. The time modulated reflectarray is a kind of reflectarray antennas with simple reconfigurable reflecting elements, which can be utilized to realize many functions including sidelobe suppression and beam forming. Compared with traditional reflectarray which use microstrip lines and phase-shifting devices, the time modulated reflectarray can control the output of array by controlling the switch-on and switch-off times of reflectarray can generate the ideal directional pattern and realize the beam forming function without adopting the phased-array units and the cooperative feeding network in the traditional phased reflectarrays. This feature will facilitate the application of beam forming technology in the millimeter-wave reflectarrays.

Keywords: time-domain modulation; reflectarray antenna; beam forming

波東賦形是一种将波束集中在目标的方向并在干扰方向最小化的信号处理算法。传统的波束形成算法可以分为2类:静态的波束形成与自适应波束形成。当目标位置与波方向已知,可使用静态波束形成。静态的波束都是预先计算,阵列通常采用固定或有限数量模式间切换的配置,达不到根据目标情况适时调整的功能。与之相反,自适应波束形成是一个动态的过程,通过计算接收到的数组信号,并预测目标变化趋势,以滤除干扰并最大限度地跟踪信号信息。因此,自适应波束赋形技术往往用于精确度及性能要求极高的应用场景中。传统的自适应波束赋形技术一般基于相控阵列,通过控制相控器件,形成理想的方向图。这些相控器件造价及复杂度较高,只适用于军工等对成本相对不敏感的工程中。时域调制阵列采用简单的二进制开关,可以低成本地实现动态波束赋形功能。时间调制阵列(Time Modulated Arrays, TMA)的概念最初发表在 20 世纪 50 年代晚期^[1]。在过去的 20 年中,TMA 吸引了来自世界各地研究团队的注意^[2-6]。TMA 与相控阵采用相同的拓扑结构,天线单元由统一的馈电网络进行馈电,但 TMA 采用简单二进制开关代替了昂贵的相移器件。这些开关采用一套预设的时间序列控制天线单元的"开"与"关",而时间序列决定了 TMA 的辐射特性(即方向图)。研究人员已经证明,TMA 除了可低成

收稿日期: 2016-10-27; 修回日期: 2016-12-25

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61601073);重庆市教委科技研究资助项目(KJ1600417);重庆邮电大学科研基金资助项目 (A2015-28)

本地实现传统相控阵的功能,还可以提供额外的功能:自适应调零^[2]、低旁瓣电平^[3-4]、波束扫描^[5]及方向跟踪^[6]。 传统的 TMA 都采用传统的微带线馈电网络,此类配置需要设计复杂的馈电网络,并且在毫米波及以上频段有较 高的线损。时间调制反射阵列(Time Modulated Reflect Arrays, TMRA)是一个相对更为简单的设计^[7],它抛弃了 复杂的馈电网络,可广泛用于毫米波等场景,是相控反射阵列的替代品。本文分析了 TMRA 的理论模型,设计 并仿真验证了 8 单元的 TMRA 阵列样机。在此基础上,进一步采用了最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)波束形成器,实现基于时域调制反射阵列的波束赋形技术。

1 MVDR 波束赋形

MVDR 技术在阵列信号处理领域广泛应用,特别是波束赋形中。它最早于 1969 年由 Capon 提出,其思想是:保证期望信号不变的情况下,使总输出最小^[8]。MVDR 算法计算出一套向量矩阵*o*,使得在特定方向响应不变,而总输出功率 *Y*(*o*)最小。假设阵列单元数量为 *M*,则阵列接收到频域信号矩阵为^[9]:

$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\omega}) = F(\boldsymbol{\omega})d + N(\boldsymbol{\omega})$

(1)

式中: $F(\boldsymbol{\omega})$ 为接收到的信号的瞬态频谱响应; d 为由天线数量及信号数量组成的阵列 $M \times P$ 多维矩阵响应; $N(\boldsymbol{\omega})$ 为期望为零的高斯噪声。

根据 MVDR 算法,权重向量矩阵为 $\boldsymbol{\omega}$,能使总输出 $Y(\boldsymbol{\omega}) = w^{\mathrm{H}} X(\boldsymbol{\omega})$ 最小且保证 $F_1(\boldsymbol{\omega})$ 无失真。该优化问题的 数学表达式为^[9]:

$$\begin{cases} \min_{W} w^{H} S w \\ \text{s.t. } w^{H} d(\omega_{1} : k_{1}) = 1 \end{cases}$$
(2)

式中: S 为 $X(\boldsymbol{\omega})$ 的协方差矩阵; \boldsymbol{w} 为波束权重矩阵, $d(\boldsymbol{\omega}_1:k_1)$ 代表 $F_1(\boldsymbol{\omega})$ 在阵列的复矩阵, $\boldsymbol{\omega}_1$ 与 k_1 分别是 $F_1(\boldsymbol{\omega})$ 的权重向量与波数。由式(2),该无畸变波束形成器的最优解应满足:

$$\boldsymbol{w} = \frac{\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{d}(\boldsymbol{\omega}_{1}:\boldsymbol{k}_{1})}{\boldsymbol{d}(\boldsymbol{\omega}_{1}:\boldsymbol{k}_{1})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{d}(\boldsymbol{\omega}_{1}:\boldsymbol{k}_{1})}$$
(3)

设计一个验证场景,见表 1,假设自由空间中有 4 路信号同时抵达接收阵列,其中 S为期望信号, J_1,J_2 和 J_3 为干扰信号。期望信号的信噪比为 0 dB,来波方向为 15°;而干

| 表1 期望信号与干扰信号配置表 Table1 Desired signal and interference signal configuration | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| angel of arrival/(°) | | | | $R_{\rm SIN}/{ m dB}$ | | | |
| S | J_1 | J_2 | J_3 | S | J_1 | J_2 | J_3 |
| 15 | 25 | 0 | -15 | 0 | 30 | 30 | 30 |

扰信号的干噪比均为 30 dB,来波方向分别为 25°,0° 和-15°。见图 1,对比组的相控阵列采用 8 单元的线性半波 长等距离排布,每个天线单元假设为简单的全向天线,且辐射功率归一化为 1。天线从自由空间中接收到包括背 景噪声、期望信号与干扰信号的集合;每幅天线配置了一套低噪放大器与移相器用于控制天线权值,并通过馈电 网络进行馈电。假设这 4 路信号都工作在相控阵的中心频率,即传播常数 k_i相等。通过式(3),可以得相控阵天 线权重矩阵 *o*,并将这权重利用移相器与低噪声放大器加载到天线单元上。通过计算,图 2 给出了该 8 单元线性 相控阵针对表 1 信号形成的方向图,该方向图符合表 1 的性能要求,主瓣落在了期望信号方向,并且在干扰方向 的响应低于-30 dB,并在-15°及 0°产生了超过-60 dB 的响应。MVDR 的优化算法及改进算法有很多^[10-12],由于 篇幅有限,本文不做深入分析。



 Fig.1 Model of phased arrays:feeding networks, phase shifters, amplifers, and antennas
 图 1 馈电网络、移相器、放大器、天线组成的相控阵模型



Fig.2 Scattering pattern of conventional 8 elements phased array based on MVDR algorithm and isotropic element patterns

图 2 基于 MVDR 波束赋形算法的传统 8 单元线性相控阵方向图

2 基于时控反射阵列的 MVDR 波束赋形

第2期

类似于传统的平面反射阵,TMRA 采用一套用于抛物面天线的馈电天线与一组反射振子组成。传统的反射 阵采用相控器件或者微带线来控制振子的辐射相位,用于实现控制整个阵列的辐射方向图,而时间调制反射阵采 用简单的时序开关,通过控制开关时间达到控制阵列方向图的功能。

假设某 TMRA 由 *M* 个辐射单元组成,每个单元由简单的单刀双掷开关控制"开"与"关"的状态。理想情况下,"开"状态表示辐射单元向四周均匀散射信号;"关"状态表示辐射单元不散射、反射任何信号。TMRA中,辐射单元始终处于时间周期性的开与关之间,每1个时间周期都为 *T*₀。定义第 *i*(*i*=1,2,3,…)个辐射单元在单个周期中的"开时刻"为 *t*_{ion},"关时刻"为 *t*_{ioff},即只有在时刻 *nT*₀+*t*_{ioff}之间,辐射单元处于全向辐射的状态。整个 TMRA 的输出方向图可以用 1 个时空多项式表示:

$$f(t,\theta) = \sum_{i}^{M} E_{i}(\theta) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda_{c}}d_{i}\sin\theta\right) I_{i}(t)$$
(4)

式中: *E_i*(*θ*)为第*i*个单元的辐射方向图,理想状况下假设为单位为1的全向辐射; *d_i*为第*i*个单元在阵列线性排列中的位置; *λ_c*为馈电天线工作频率在自由空间中的波长; *I_i(t*)为辐射单元周期性调制信号,

$$I_{i}(t) = \begin{cases} 1, & nT_{0} + t_{ion} \leq t < nT_{0} + t_{ioff} \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$
(5)

由傅里叶级数可知,任一周期函数都可以展成正弦(余弦)函数的无穷级数。经过周期性调制的 TMRA 散射波 会产生谐波,谐波的频点会落在 $f_c \pm m/T_0$,其中 m为常数, $f_c = c/\lambda_c$ 为工作频率。利用式(5)的傅里叶级数展开, 可以知道在 m 阶谐波的远场方向图:

$$F_m(\theta) = \sum_{i}^{M} jE_i(\theta) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda_c}d_i\sin\theta\right) s_{im}$$
(6)

式中 s_{im} 为 $I_i(t)$ 的傅里叶级数的展开系数,

$$s_{im} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_i(t) e^{-jm\frac{2\pi}{T_0} dt}$$
(7)

式(7)可以展开为:

$$r_{im} = \frac{\sin\left[\pi m \left(\tau_{ioff} - \tau_{ion}\right)\right]}{\pi m} e^{-j\pi m \left(\tau_{ioff} + \tau_{ion}\right)}$$
(8)

 $\vec{x} \div: \quad \tau_{\text{ioff}} = \frac{t_{\text{ioff}}}{T_0}; \quad \tau_{\text{ion}} = \frac{\tau_{\text{ion}}}{T_0} \circ$

通过式(7)与式(8)建立复权重 w 与傅里叶系数的转换,其中 $\frac{\sin \left[\pi m(\tau_{ioff} - \tau_{ion})\right]}{\pi m}$ 为 w 的幅度, $e^{-j\pi m(\tau_{ioff} + \tau_{ion})}$ 为 w 的相位。进一步演化式(8),可以得到开关时刻采用 权重 w 的表达式

$$\tau_{ion} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\pi m} phase(w_i) - \frac{1}{\pi m} a \sin(\pi m |w_i|) \right]$$

$$\tau_{ioff} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\pi m} phase(w_i) + \frac{1}{\pi m} a \sin(\pi m |w_i|) \right]$$
(9)

见图 3, 某线性时域调制反射阵由 8 个开关控制的 可重构反射单元组成, 可在"开"与"关"状态切换。 馈电天线被放置在足够远的位置, 使每个反射单元至 馈电天线的距离一致。反射单元的间距统一为馈电

天线工作频率的半波长。假设反射单元的反射方向图是全向的,且接收信号与表1一致。与传统相控阵使用相控器不同,时域调制反射阵采用可重构单元,在单元上加载预先计算好的 MVDR 权重矩阵。利用式(3)与式(9),可以快速地计算出加载 MVDR 权重的时间序列。设 *m*=1,利用式(9)计算出时序,此时序1个单位周期内的时间分布见图4,色块表示该单元在1个单位周期内处于"开"状态的时间。利用此时序图,可以使用简单的射频开关控制反射阵内的反射单元。



feeding antenna





Fig.4 TMRA element switching sequence based on MVDR beamforming 图 4 八单元时域调制反射阵时序图 Fig.5 Scattering pattern of TMRA at 1st harmonic frequency based on MVDR algorithm and isotropic element patterns
 图 5 基于 MVDR 波束赋形算法的传统 8 单元时域调制反射阵方向图

在周期开关控制下,利用式(6),可以计算出形成的反射阵在不同阶次谐波下的方向图。图 5 表示使用该周期序列在第 1 阶谐波上形成的方向图,该方向图与相控阵所得方向图一致;主瓣落在期望方向(15°)上,干扰方向(-15°,0°,25°)均低于-50 dB。结果显示,理想的 TMRA 可以利用简单开关实现波束赋形的功能。

3 结论

252

本文介绍了基于时域调制反射阵列的波束赋形方法。时域调制反射阵采用简单的单刀双掷开关,通过控制阵 单元的开关时序,实现控制阵列输出方向图的功能。相对于传统反射阵及相控阵,时域调制反射阵可以不采用复 杂馈电网络与相移器件,同时又可以灵活实现动态波束赋形的功能。本文展示了一套八单元时域调制反射阵列利 用 MVDR 波束形成器,成功实现了在噪声背景下接收1路期望信号并隔离3路干扰信号,其形成波束与传统相 控阵雷达一致。该方法有着广泛的适用性,可用到超大规模天线阵列中,大大减少系统复杂度及硬件成本,对推 广波束赋形技术有着积极效果。时域调制反射阵列理论上可以实现相控阵列波束赋形功能,适用于要求低复杂度、 低成本的波束赋形系统,是传统相控阵及反射阵的有益补充。

参考文献:

- [1] SHANKS H, BICKMORE R W. Four-dimensional electromagnetic radiators[J]. Canadian Journal of Physics, 1959, 37(3):263-275.
- [2] ROCCA P,POLI L,OLIVERI G,et al. Adaptive nulling in time-varying scenarios through time-modulated linear arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012(11):101-104.
- [3] POLI L,ROCCA P,MASSA A. Sideband radiation reduction exploiting pattern multiplication in directive time-modulated linear arrays[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2012,6(2):214-222.
- [4] YANG S,GAN Y B,QING A,et al. Design of a uniform amplitude time modulated linear array with optimized time sequences[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005,53(7):2337-2339.
- [5] TONG Y, TENNANT A. A two-channel time modulated linear array with adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(1):141-147.
- [6] TENNANT A. Experimental two-element time-modulated direction finding array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010,58(3):986-988.
- [7] WANG Y, TENNANT A. Time-modulated reflector array[J]. Electronics Letters, 2012, 48(16):972-974.
- [8] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969,57(8):1408-1418.
- [9] VAN TREES H. Optimum waveform estimation[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2002.
- [10] 徐尧,王大鸣,陈坤汕. 一种基于波束赋形的空分复用 MIMO 接收方案[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):
 730-735. (XU Yao,WANG Daming,CHEN Kunshan. Beamforming based spatial multiplexing MIMO receiving scheme[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):730-735.)
- [11] 周浩,袁志勇. 基于 MVDR 自适应波束的高分辨方位估计[J]. 武汉理工大学学报, 2009,31(9):118-121. (ZHOU Hao, YUAN Zhiyong. High resolution DOA estimation algorithms based on MVDR beam former outputs[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(9):118-121.)