

基于 FFT 变换的阵列天线低副瓣方向图综合

徐秀成¹, 刘 强²

(1. 中国人民解放军 63778 部队, 黑龙江 佳木斯 154003;

2. 防空兵指挥学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 阵列天线的最大优点是可波束赋形, 产生低副瓣的和特定零陷的方向图, 加窗锥削即是波束赋形的一种。本文针对有限视场相控阵进行分析, 根据所要产生的动态方向图, 采样后用 IDFT 的方法得到阵列加权序列; 另一方面根据不同的波束宽度和低副瓣要求采用相应的窗函数, 再根据确定波束指向的相位, 由 DFT 计算得到方向图, 使用 Matlab 的 FFT 算法绘制方向图。

关键词: 阵列天线; 波束赋形; 空时等效性; 空间滤波; DFT; FFT

中图分类号: TP391.7

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2009)06-34-3

FFT Based Limited Field-of-View Array Antenna Pattern Synthesis

XU Xiu-cheng¹, LIU Qiang²

(1. PLA Unit 63778, Jiamusi Heilongjiang, 154003

2. PLA Air Defence Forces Command Academy, Henan Zhengzhou, 450052)

Abstract: Beam forming, say windows taper, is the most attractive virtue of array antenna. This paper proposes a pattern synthesis measure by sampling live pattern. IDFT is applied to get the weight of array, based on the live pattern of the limited field-of-view phased array. On the other hand, the pattern can be drawn by DFT of the power samples of elements of array, with Matlab software. And the result can be observed.

Key words: Array antenna; beam-forming; time-space equivalent; space filter; DFT; FFT

0 引言

相控阵雷达是通过控制馈入阵列天线辐射阵元的电信号的相位和幅度来改变波束指向和方向图形状的, 相对机械扫描天线而言, 不仅可以波束赋形, 还具有无惯性、高速扫描的优点。

然而, 相控阵的成本和数据处理巨大是实际应用的一个劣势, 采用最少控制个数的稀疏布阵^[1]的有限视场扫描相控阵减小阵元互耦, 大大节约了成本和控制数量。但稀疏布阵限制了最大扫描角^[1]。

均匀照射阵列波束副瓣电平 -13.46 dB, 难以达到抗干扰效果, 为了形成低副瓣的方向图, 必须采取幅度加权降低副瓣。

1 DFT 方向图综合

1.1 算法

天线方向图是空间角度的函数, 有源相控阵的带指向(不同波束方向 ψ_l) 的方向图可以通过控制

各阵元的幅度和相位来实现, 图 1 即为一个具有幅度和相位控制的线阵, 它由 N 个间距 d 的阵元组成的线阵, 信号电磁波波长为 λ 。

以中心位置为相位中心, 则当扫描角度为 ψ_l 时, 远场点上的归一化电场为:

$$E(\sin\psi_l) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \exp\left[\frac{j2\pi d}{\lambda} \left(n - \frac{N-1}{2}\right) \sin\psi_l\right]. \quad (1)$$

展开并提取公因式:

$$E(\sin\psi_l) = e^{j\varphi_0} \{ w(0) e^{-j(N-1)\Delta\phi} + w(1) e^{-j(N-2)\Delta\phi} + \dots + w(N-1) \},$$

式中, $\varphi_0 = \frac{\pi(N-1)d}{\lambda} \sin\psi_l$, $\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\psi_l$, φ_0 、 $\Delta\phi$ 分别代表了半阵面相位差和单位相位差(2 个相邻阵元的相位差, 即 $2\pi q/N$)。

利用幅度加权窗序列 $w(n)$ 的对称性, 即 $w(0) = w(N-1)$ 、 $w(1) = w(N-2) \dots$ 上式可以表

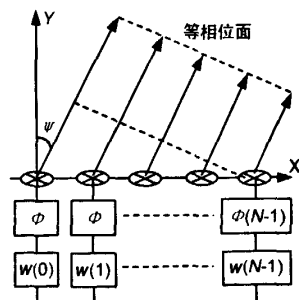


图 1 线阵波束形成控制

收稿日期: 2009-08-25

作者简介: 徐秀成(1976-), 男, 工程师。主要研究方向: 信号与信息处理。

示为:

$$E(\sin\phi_l) = e^{j\varphi_0} \{ w(N-1)e^{-j(N-1)\Delta\phi} + w(N-2)e^{-j(N-2)\Delta\phi} + \dots + w(0) \}. \quad (2)$$

定义 $V_1^n = e^{-j\Delta\varphi^n}$, $n=0,1,\dots,N-1$, 则式(2)为:

$$E(\sin\phi_l) = e^{j\varphi_0} \{ w(N-1)V_1^{N-1} + w(N-2)V_1^{N-2} + \dots + w(0) \} = e^{j\varphi_0} \sum_{n=0}^{N-1} w(n)V_1^n,$$

式中, 序列 $w(n)$ 的离散傅里叶变换定义为:

$$W(q) = \text{DFT}(w) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)e^{-j\frac{2\pi nq}{N}}, q = \frac{Nd}{\lambda} \sin\phi_l, E(\sin\phi_l) = e^{j\varphi_0} W(q). \quad (3)$$

方向图由式(3)的模来计算, 最终表示为:

$$G(\sin\phi_l) = G_0 |W(q)|, \quad (4)$$

式中, G_0 为阵元方向图。变换中的关系有: $u_q = \sin\phi_l = \lambda q / Nd$,

$$\Delta\phi_q = 2\pi q / N = 2\pi d(\sin\phi_q) / \lambda = kd \sin(\phi_q) = kdu_k. \quad (5)$$

当 $d = \lambda/2$, u_k 从 -1 到 1 变化时, $\Delta\phi_q$ 从 $-\pi$ 到 π 。

对于不同的 l , 对应不同扫描方向的波束, 所以这也是一种多波束形成方法, 又叫 DFT 法。对于 N 元阵, 最多产生 N 个独立波束。

所以上面的 n 和 q 相当于时频变换中的 t 和 f 。由 $w(n)$ 控制的天线口径电流分布与天线方向图之间就像信号时间波形与信号频谱之间一样, 存在着傅里叶变换对关系。序列 $w(n)$ 幅度加权即相当于在由相位加权确定的特定的方向上的空间滤波。

1.2 仿真

DFT 方法通常应用在 $d \geq 0.5\lambda$ (可视区内) 时的稀疏阵的情况, 变化得到的方向图是对所需方向图的最小均方 (LMS) 逼近。目前利用插值方法, 也可以产生 $d/\lambda > 0.5$ 的方向图。

Matlab7 提供了包括表 1 中窗函数等共 16 种窗函数, 以及用户自定义窗函数接口。

表 1 常用窗函数引起方向图变化比较

窗	主波束相对宽度	峰值下降	第一副瓣/dB
矩形窗	1	1	-13.46
Cosine	2	0.816	-23.5
Hamming	2	0.73	-41
Hanning	2	0.664	-32
Blackman	6	0.577	-66

对于二维面阵, 方向图的阵列因子是正交方向的 2 个方向图的乘积, 应用二维傅里叶变换即可。在 Matlab 中应用函数 FFT2(w, MROWS, NCOLS), 其中, MROWS, NCOLS 分别是 FFT 变换的点数^[3]。

图 2 和图 3 是 16×16 阵元的平面阵, 在加窗和不加窗下的方向图。

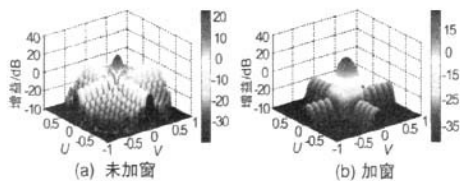


图 2 FFT2 方法绘制的标准的阵列方向图阵元间隔 ($d = 0.5\lambda$)

由图 2 可见, 加了窗后副瓣降低, 但主瓣变宽, 这就要求在设计中综合考虑。算法上快速傅里叶变换 FFT, 能够满足实时性的要求。当 $d > \lambda$ 时, 开始出现栅瓣。

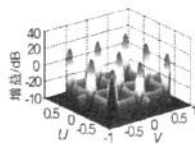


图 3 加 Hamming 窗的阵列方向图 ($d = 1.5\lambda$)

2 IDFT 计算阵列加权序列

2.1 方法

为了形成低副瓣或具有特定方向零陷得的方向图, 可以用 IDFT 方法计算产生特定指向下方向图的幅度加权 $w(n)$, 控制接收阵列接收目标信号, 实现抑制干扰的波束综合^[2]。

$$w(n) = \text{IDFT}(W(q)) = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} W(q) e^{j\frac{2\pi nq}{N}} = \frac{1}{N} e^{-j\theta_0} \sum_{q=0}^{N-1} E(\sin\phi_q) e^{j\frac{2\pi nq}{N}}, q=0,1,\dots,N-1. \quad (6)$$

首先对要得到的方向图在波束空间采样, 间隔 λ/Nd , 然后经 IDFT 得到 $w(n)$ 。计算过程按阵元间距 d 分 2 种情况:

一种是间距不小于 $1/2$ 个波长: ① 基于采样理论, 对要得到的方向图在波数空间或 U 空间的整个可视区间采样 N 个, 得到 $B_\psi(\psi_k)$, 采样点 $\psi_k = (k - (N-1)/2)2\pi/N$; ② 利用公式(6), 计算得到 $w(n)$ 。另一种小于半波长: 重复上面过程, 采样区域和采样间隔都将相应调整, 具体见文献^[2]。

2.2 应用举例

① 应用反变换 IDFT, 实现一定副瓣电平下最小主瓣宽度的 Dolph-Chebyshev 加权^[2];

② 通过远场 P 点的电场强度及扫描角, 可利用上述 IDFT 方法计算得到阵元加权矢量, 和实际馈入的值比较, 了解相位和幅度校准情况。

时域信号与空域信号比较如表 2 所示。

表 2 时域信号与空域信号比较

特征	时域信号	空域信号
变元	时间采样	空间采样
谱	频谱	空间谱
系统函数	传递函数	方向图
波束处理	对某些频率的信号加强或抑制	对某些方向的信号加强或抑制

3 结束语

本文介绍利用空时等效性(时域和空域信号的比较见表 2),采用离散傅里叶变换对空间阵列加窗的办法,实现低副瓣的方向图。

阵列天线的各阵元幅度和相位可通过计算机精确控制。DFT 多波束合成方法的意义在于:可以根

(上接第 30 页)

通过这个方案实现了 2 个发送分集增益的量化 ZF 频域均衡算法的频域均衡系数为:

$$W_{ZF} = 1/\tilde{\Lambda}(n, n) \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (14)$$

于是,

$$\hat{X}_{ZF} = \begin{bmatrix} \hat{X}_1^{(k)} \\ \hat{X}_2^{(k)} \end{bmatrix} = \tilde{Y}W_{ZF}o \quad (15)$$

式(14)中, $\hat{X}_1^{(k)}$ 和 $\hat{X}_2^{(k)}$ 经过 IFFT 和判决后就可以得到发送信号的估计值。

若采用 MMSE 频域均衡,MMSE 均衡器的均衡系数为:

$$W_{MMSE} = 1/(\tilde{\Lambda}(n, n) + 1/SNR) \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (16)$$

图 3 为 STBC-SC-FDE 系统的性能仿真。仿真中,天线设置分别为 2 发 1 收和 2 发 2 收,输入信号采用 QPSK 调制,每条路径的信道参数由上述散射信道仿真模型产生,信道的多径数为 $L=3$,每个发送分组长度为 128,分别采用 ZF 均衡和 MMSE 均衡算法。仿真结果表明,MMSE 均衡比 ZF 均衡有更好

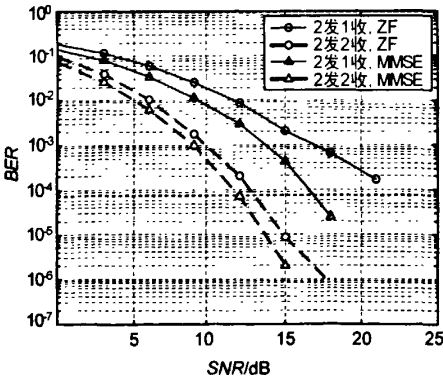


图 3 STBC-SC-FDE 系统性能仿真

据接收阵空间能量采样计算方向图;再根据有用信号来波方向等信息,修改原始方向图为较理想的方向图,再经 IFFT 方法计算产生特定指向下特定形状方向图的幅度加权 $w(n)$,控制接收阵列接收目标信号,抑制杂波的影响。FFT 算法可以利用高速 FPGA 技术实现。对于稀疏阵产生的栅瓣,可借助机械天线的转动,在小视角内电扫描,可以防止栅瓣进入扫描空域。

参考文献

[1] 陈克松. 稀疏天线阵列的优化布阵技术研究[D]. 电子科技大学博士论文, 2006.
[2] HARRY L, TREES V. Optimum Array Processing[M]. USA: Wiley InterScience. 2002.

4 结束语

本文研究了 STBC 编码在平坦衰落信道和对流层散射信道中的编解码方案,并通过计算机仿真其性能,研究结果表明 MIMO 技术在对流层散射中的应用有着很好的应用前景。下一步的工作主要是 MIMO 在对流层散射中的具体工程实现和探索 MIMO 技术与其他技术相结合提高对流层散射通信的性能或者频谱效率。

参考文献

[1] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451 - 1458.
[2] DHAHIR N A. Single-carrier frequency-domain equalization for space time block-coded transmissions over frequency-selective fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(7): 304 - 306.
[3] ZHOU SHENG-LI, GIANNAKIS G B. Single-carrier space time block-coded transmissions over frequency-selective fading channels [J], IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(1): 164 - 179.
[4] 张蔚, 封志宏. MIMO 技术的空时编码技术[J]. 甘肃科技纵横, 2006(5): 19 - 20.
[5] 骆正彬, 汪志康, 姜淑霞. 对流层散射信道模型及其模拟方法[J]. 无线电通信技术, 1983, 9(8): 1 - 12.
[6] 杨兵. MIMO 系统中空时编码与频域均衡技术的研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
[7] 张静. 频率选择性信道下 SC-STBC 编码基于训练序列的频域估计与均衡[D]. 南京: 南京邮电大学, 2006.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>