

平面天线阵方向图的 FFT 算法简析

刘俊群

(南京电子技术研究所,江苏省南京市 210013)

摘要:介绍了平面天线阵中常见的方向图 FFT(快速傅里叶变换)算法原理,指出该算法在应用中应考虑的条件、范围等,在基本计算原理的基础上,利用常规算法程序给出线阵的计算实例,分析各实例有待扩展的计算特性,并分析原因、给出扩展方法,在此基础上给出线阵和平面阵列的扩展算法计算实例,结果表明该扩展算法能满足一般线阵和平面阵列的方向图计算需求,提高计算效率。

关键词:平面天线阵;方向图;FFT;周期性

中图分类号:TN821.8

0 引言

FFT(快速傅里叶变换)算法最初是从数字信号处理中发展起来的,是 DFT(离散傅里叶变换)的一种快速算法^[1],由于 DFT 的计算公式与天线阵的阵因子计算公式有类似之处,因此在计算天线阵方向图时可以利用 FFT 算法快速获得结果,提高了计算效率。

1 计算原理

对有限长序列 $x(n)$,一维 DFT、IDFT(离散傅里叶反变换)公式分别为^[1]:

$$X(k) = \text{DFT}[x(n)] = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{-kn} & k \in [0, N-1] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$x(n) = \text{IDFT}[X(k)] = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-kn} & n \in [N-1] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_N = e^{-j2\pi/N}$ 。

等间距 d 单元直线阵(作为平面矩形天线阵的特例)的方向图形式为^[2]:

$$f(\theta) = f_e(\theta) \sum_{k=0}^{N-1} A_k e^{jP_k} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} k d \sin \theta} \quad (3)$$

式中: $f_e(\theta)$ 为单元方向图,有 N 个单元,单元下标从 0 开始计数; A_k 、 P_k 分别为第 k 个单元的幅度、相位(弧度),两者都可以是相对于某一单元的值; θ 为辐射方向与线阵法线的夹角(rad),右为正,左为负; 和式为阵

因子。

为便于比较,式(2)可变为:

$$x(n) = \text{IDFT}[X(k)] = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N} kn} & n \in [0, N-1] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

比较式(4)和式(2),和式内部分有如下对应关系:

$$\begin{cases} A_k e^{jP_k} \Leftrightarrow X(k) \\ \frac{ds \sin \theta}{\lambda} \Leftrightarrow \frac{n}{N} \end{cases} \quad (5)$$

由于依据式(3)计算阵列方向图时单元方向图一般作为常数处理(与 θ 无关),而式(4)中 $1/N$ 也是常数,与方向图计算无关,因此式(5)就是两者在这一问题上的真正区别,有了式(5)的对应关系,就可以利用已开发出的 FFT 算法快速求解式(3)等间距线阵的方向图计算问题。

2 应用条件与范围

2.1 单元等间距要求

显然,应用式(5)(令对应两端相等)作线阵方向图的 FFT 计算时,它的建立基础式(3)已要求线阵单元间必须是等间距 d 的,因此等间距要求是该算法的一个基本条件。

2.2 角度计算范围

由式(5)变换可得:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{n}{N} \cdot \frac{\lambda}{d} \right) \quad (6)$$

由天线原理可知,线阵的角度 θ 的全范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$,为了使角度计算范围比较对称,根据式(4)变换关于 n 的周期性(周期为 N),式(6)中 n 通常取 $[-N/2, (N-1)/2]$,这样当 $d < \lambda/2$ 时,式(6)可以覆盖角度的全范围(不考虑 n 的整数量化效应误差),

当 $d \geq \lambda/2$ 时只能覆盖角度的一部分范围, 即 $\left[\sin^{-1}\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d}\right), \sin^{-1}\left(\frac{N-1}{2N} \cdot \frac{\lambda}{d}\right) \right]$ (单位为 rad)。

由于三角函数的非线性, 由式(6)求出的角度值在法线(0°)周围最细密, 越往边线角度值越粗疏。

2.3 单元方向图

式(3)是线阵的准确计算式, 其中有单元方向图 $f_e(\theta)$, 一般情况下单元方向图方向性较小^[3], 即方向图函数 $f_e(\theta)$ 在法线(0°)两侧一个较大的范围(如 $-65^\circ \sim 65^\circ$)都维持一个常数值, 因此单元方向图在计算阵列方向图时作常数近似处理, 此时用对应的 FFT 算法求出的阵列方向图在法线两侧一个较大的范围都是准确方向图的良好近似。当角度靠近两侧边线($\pm 90^\circ$)时, 单元方向图函数值从上述常数值逐步减小, 此时为了更好地逼近准确方向图, 可将 FFT 算法结果方向图阵因子乘以单元方向图因子 $f_e(\theta)$ 。

3 线阵计算实例

现有均匀直线阵(等相), $N=10, d=0.5\lambda$, 求其方向图。根据以上原理编制的常规 FFT 计算方向图程序结果见图 1。 $d=0.7\lambda, d=0.3\lambda$ 时的方向图分别见图 2 和图 3。实际物理空间的横坐标角度范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

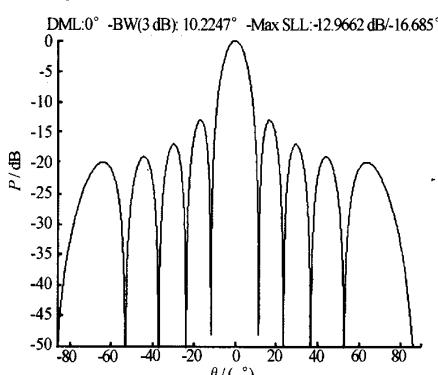


图 1 $N=10, d=0.5\lambda$, 均匀直线阵方向图

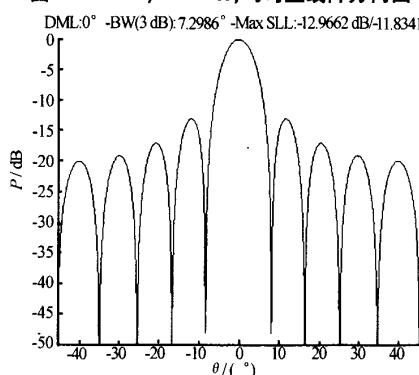


图 2 $N=10, d=0.7\lambda$, 均匀直线阵方向图

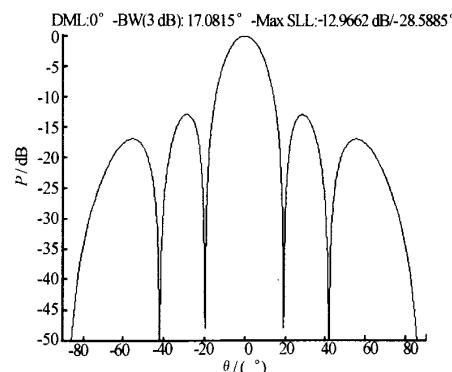


图 3 $N=10, d=0.3\lambda$, 均匀直线阵方向图

比较图 1 ~ 图 3 可以发现, 图 1 横坐标角度不对称, 图 2 横坐标角度范围不够实际物理空间, 图 3 横坐标角度范围超出实际物理空间。

程序结果有令人不满意的现象, 是因为常规计算程序未利用式(4)中变换结果关于 n 的周期性, 周期为 N :

$$x(n) = x(n + mN) \quad m \text{ 为任意整数} \quad (7)$$

考虑式(7)的修订扩展计算程序对应的计算结果如图 4 ~ 图 6 所示, 它们分别对常规算法给出结果的问题进行了改进扩展, 满足了计算需求。

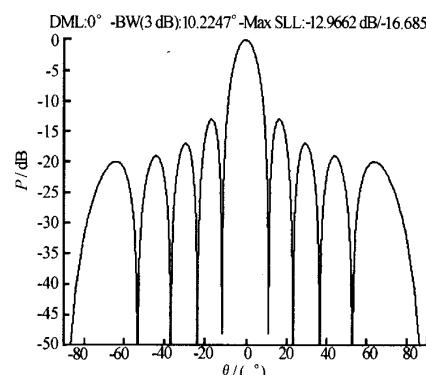


图 4 图 1 的修订方向图

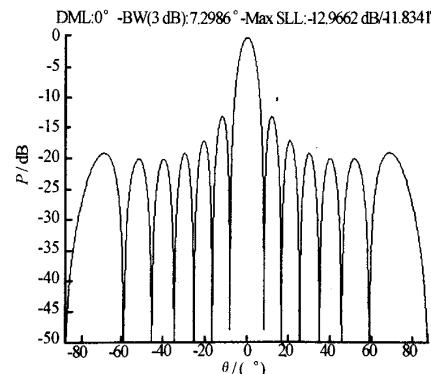


图 5 图 2 的修订方向图

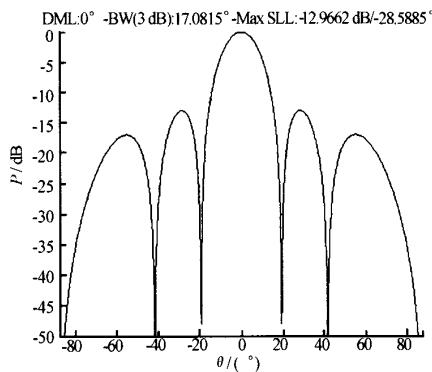


图 6 图 3 的修订方向图

4 面阵扩展

对于常规的平面阵列,只要横向与纵向间距 d_x 与 d_y 维持等间距,同样矩形阵列阵因子与二维 DFT 公式相通^[4],也可以应用二维 FFT 算法来计算阵因子,此时特别节省时间。图 7 为 10×10 单元、 $d_x = 0.5 \lambda$ 、 $d_y = 0.5 \lambda$ 的矩形阵列方向图俯视图(球坐标系,颜色表示功率电平)。

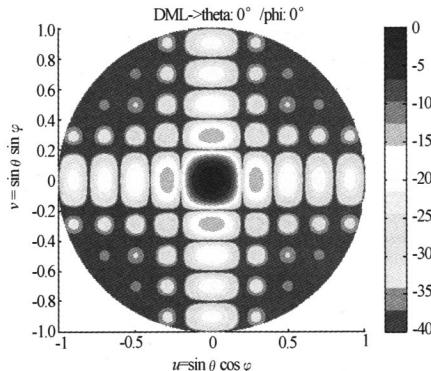


图 7 一个矩形阵列方向图

图 8 为图 7 阵列扫描方向图。同样在面阵算法中,也必须利用二维 FFT 公式的周期性才能计算出所有实际物理空间方向的方向图值,如图 7、图 8 所示。

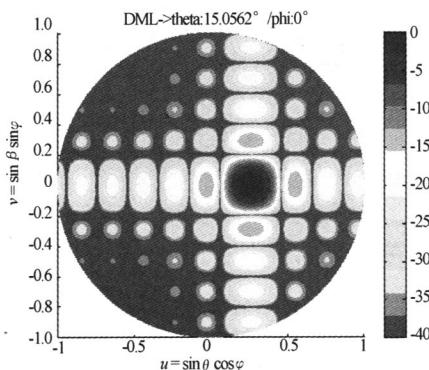
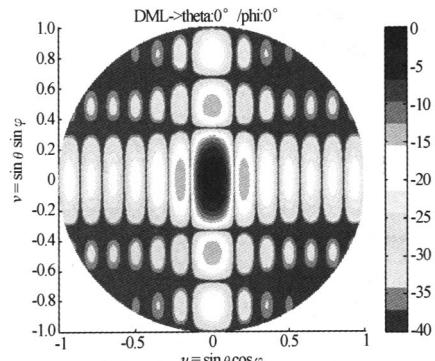
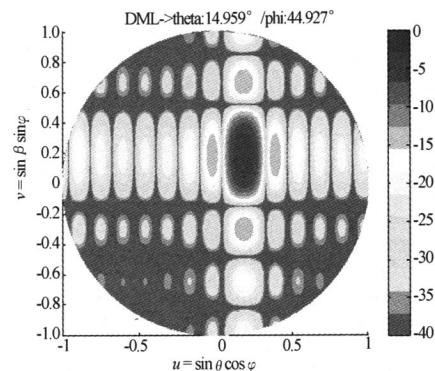
图 8 图 7 阵列沿横轴右扫描 15° 方向图

图 9 为 10×10 单元、 $d_x = 0.7 \lambda$ 、 $d_y = 0.3 \lambda$ 的矩形阵列方向图,图 10 为图 9 阵列扫描到空间一指定角度的方向图。这些实例表明该算法具有比较广的应用范围。

图 9 $d_x = 0.7 \lambda$ 、 $d_y = 0.3 \lambda$ 矩形阵列方向图图 10 图 9 阵列扫描到 $\theta = 15^\circ$ 、 $\varphi = 45^\circ$ 方向图

5 结束语

本文对平面矩形阵列方向图计算中的 FFT 算法进行了简要分析,给出了常规算法的扩展方法,可以根据计算原理与公式编制计算程序,提高计算效率。

参 考 文 献

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [3] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [4] HANSEN R C. Phased array antennas[M]. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1998.

刘俊群(1973-),男,高级工程师,主要从事地面有源相控阵雷达天线系统的研制工作。

(下转第 10 页)

下,0.9 dB 起伏通过非线性环节后,也将导致 3 dB 误码恶化^[3],因此,在系统设计中,实现复杂程度与系统已有条件之间合适选择调制解调方式是非常重要的。

4 结束语

饱和放大器对限带的 PSK 信号随着调制阶数的增加,影响也越大,同时,成型滤波器的使用也非常关键。OQPSK 与 QPSK 相比,实现的复杂程度增加,但当功放的非线性变化很大时,还是有明显的差异。

在利用雷达进行通信信号传输时,饱和功放的非线性限制了单一信道多载波传输,但射频带宽相对较宽,功率资源几乎不受限制,因此,完全可以考虑不使用发送成型滤波器,调制解调方式也可以根据实际情况进行选择,而不一定非要选择实现复杂度更高的恒包络调制解调方式。

参 考 文 献

- [1] POCHMARA J. Modeling power amplifier nonlinearities with artificial neural network [C]//Proceedings of 14th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Jun 21-23, 2007, Ciechocinek, Poland. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 449-453.
- [2] SALEH A A M. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers [J]. IEEE Transactions on Communications, 1981, 29(11): 1715-1720.
- [3] JONES A E, WILKINSON T A H. Performance of GMSK in nonlinear channel [J]. Electronics Letters, 1992, 18(17): 1605-1607.
- [4] TRANTER W H, 等. 通信系统仿真原理与无线应用 [M]. 肖明波, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2005.

袁 刚(1972-),男,高级工程师,主要从事通信系统总体技术研究。

Simulated Analysis of the Influence of Nonlinear Power Amplifier on Digital Communication

YUAN Gang, SHAO Jing

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: This paper establishes a simulation model of simplified PSK communication system which could achieve higher computation efficiency compared with the Monte Carlo simulation model. With the proposed model, frequency spectrum and bit error rate of BPSK and QPSK signals through the saturated power amplifier are simulated, and the influence of shaping filter on PSK signal as well as OQPSK signal properties in the non-linear channel are analyzed. All this provides an analysis method for the transmission of communication signal in radar channel.

Keywords: simulation model; PSK; saturated power amplifier; digital communication; shaping filter

(上接第 3 页)

Brief Analysis of FFT Algorithm for Pattern of Planar Array Antennas

LIU Junqun

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: This paper introduces the principle of common FFT algorithm for antenna pattern computation of planar array antennas and points out conditions and range of application of this algorithm. The algorithm is illustrated by a few computed examples of linear array antennas. The characteristics of the algorithm are analyzed and proved to be need extension. Then this paper gives the extending methods of the unsatisfactory algorithm after analyzing the reasons, and gives the corresponding computation examples of the linear array antennas and some examples of planar array antennas using the extended algorithm. The results show that the computation requirement of the pattern of conventional linear and planar array antennas can be met using the extended algorithm and that the computation efficiency is improved.

Keywords: planar array antenna; pattern; FFT; periodicity

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,一直致力于专注于微波、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>