

方向回溯天线阵研究

郭玉春 张光生 周军

(江南电子通信研究所, 浙江嘉兴 314033)

摘要: 本文首次提出了广义相位共轭条件, 统一分析了 VanAtta 阵和 PON 阵两种典型方向回溯天线阵的工作原理, 比较了两种天线阵列的优缺点, 理论推导了方向回溯天线阵的单站和双站雷达散射截面的表达式, 为方向回溯阵的进一步的研究奠定了基础。

关键词: 方向回溯阵, VanAtta 阵, 相位共轭阵, 波束指向误差

Research on the Retrodirective Antenna Array

Guo Yu Chun Zhang Guang Sheng Zhou Jun

(Jiangnan Electronic Communication Research Institute, Jiaxing, Zhejiang 314033, China)

Abstract: In this paper, the generalized phase conjugation condition is firstly proposed. On the basis of the generalized phase conjugation condition, the principles of the VanAtta array and phase conjugation array(PON) are analyzed, and the advantages and disadvantages of the two typical retrodirective antenna array are discussed. The expressions of monostatic and bistatic RCS are theoretically derived. It lay a foundation for the further research of the retrodirective antenna array.

Keywords: Retrodirective array; VanAtta array; Phase conjugation array; Beam point error

1 引言

近年来, 随着移动通信用户数量的急剧增长, 频率资源日益紧张, 现代无线通信系统迫切需要低成本、高增益、同时具有自动波束跟踪能力的新型天线。方向回溯天线基于相位共轭技术实现自动波束跟踪^[1], 由于该天线能自动发射来波的响应信号到来波方向实现通信链路的自动优化, 且不需预先知道来波方向。与相控阵和智能天线相比不需要复杂的数字信号处理, 具有快速跟踪和高性价比的特点, 在通信和雷达领域具有广泛的应用前景。

方向回溯功能的实现主要采用 VanAtta 阵和基于混频技术的相位共轭阵两种方式。在现有文献中对这两种阵列的工作原理都是各自表述没有统一的工作原理。对 VanAtta 阵采用端口相位梯度反向, 对相位共轭阵采用相位共轭条件分别解释。

本文首先介绍了方向回溯天线的基本概念, 首次提出了实现方向回溯功能的必要条件——广义相

位共轭条件, 并采用广义相位共轭条件具体分析了 VanAtta 阵和 PON 阵实现方向回溯功能的工作原理, 比较了两种阵列的优缺点。理论推导了方向回溯阵的单站和双站雷达散射截面表达式, 为方向回溯天线阵的进一步研究奠定了基础。

2 方向回溯天线

根据 IEEE 标准定义^[2], 方向回溯天线是这样一种天线: 天线的单站散射截面与该天线的最大方向系数和其在源方向的投影面积的乘积可比拟, 并且与源方向无关的一种天线。方向回溯天线最主要特性就是方向回溯性, 即可以反射任意方向的来波信号到来波方向, 一般实现方向回溯天线采用阵列形式实现, 见图 1 所示。

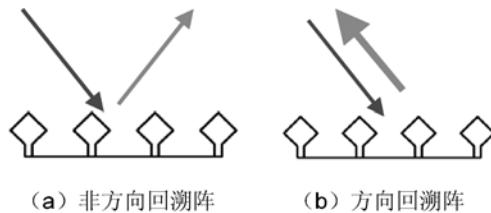


图 1 方向回溯阵工作示意图

2.1 广义相位共轭

天线阵实现方向回溯功能的条件就是相位共轭条件^[3], 即阵列的每个端口接收相位和发射相位共轭, 如式(1)所示。在满足该条件下天线阵各单元在远区可获得信号同相叠加。

$$\varphi_i^t = -\varphi_i^r \quad (1)$$

式中, φ_i^r , φ_i^t 分别为天线单元收发相位阵。

对式(1)做简单的变形, 可给出天线阵实现方向回溯更一般的条件, 即只要天线单元收发信号的相位和为一常数, 天线就可以实现方向回溯功能, 见式(2), 此式即为广义相位共轭条件。

$$\varphi_i^t + \varphi_i^r = C \quad (2)$$

当常数 $C=0$ 时, 就是文献中通常说的相位共轭条件, $C \neq 0$ 表示信号波的波阵面只是向前或向后移动一个距离, 不影响阵列的方向回溯特性。在满足广义相位共轭条件下, 天线阵可以实现任意方向的方向回溯, 与来波方向无关, 实现了波束的自动跟踪。

2.2 实现方式

方向回溯天线阵主要有 VanAtta 天线阵^[4]和基于混频技术的相位共轭阵^[5]两种方式, 其工作原理都基于广义相位共轭条件。

2.2.1 VanAtta 阵

Van Atta 阵^[4]是由多个与阵列几何中心对称的天线单元对组成, 每个天线对用等电长度(或者相差多个工作波长)传输线连接, 如图 2。工作时, 阵列中某个天线单元接收的信号被与它成对的另外一个天线单位再辐射出去。通常阵元数为偶数, 奇数阵元数可通过阵列中心放置一个天线单元, 其连接长度为其它天线对的一半长度来实现。

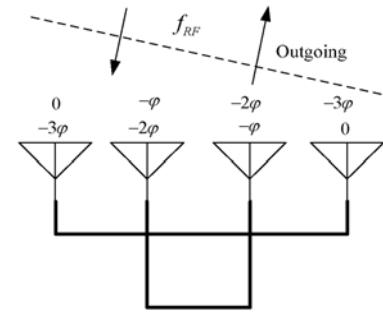


图 2 VanAtta 阵

假设 VanAtta 阵天线位于 xoy 平面, 任意一个单元的位置为 (x_n, y_n) , 与之成对的单元位于 $(-x_n, -y_n)$, 对于任意方向 (θ_{in}, ϕ_{in}) 来波, 在接收状态下天线阵端口相位分别为:

$$\begin{cases} \varphi_n^r(x_n, y_n) = k_{in} \left(x_n \sin \theta_{in} \cos \phi_{in} + \right. \\ \left. y_n \sin \theta_{in} \sin \phi_{in} \right) \\ \varphi_n^r(-x_n, -y_n) = k_{in} \left(-x_n \sin \theta_{in} \cos \phi_{in} - \right. \\ \left. y_n \sin \theta_{in} \sin \phi_{in} \right) \end{cases} \quad (3)$$

通过连接等长度的传输线, 成对的单元发射信号的初始相位为:

$$\begin{cases} \varphi_n^t(x_n, y_n) = \varphi_n^r(-x_n, -y_n) - \varphi_l \\ \varphi_n^t(-x_n, -y_n) = \varphi_n^r(x_n, y_n) - \varphi_l \end{cases} \quad (4)$$

式中, φ_l 为传输线引起的相位延迟。

对于任何一对单元天线 φ_l 都为常数, 各单元收发相位之和为:

$$\begin{cases} \varphi_n^t(x_n, y_n) + \varphi_n^r(x_n, y_n) = -\varphi_l \\ \varphi_n^t(-x_n, -y_n) + \varphi_n^r(-x_n, -y_n) = -\varphi_l \end{cases} \quad (5)$$

式(5)显示这种布局的阵列满足广义相位共轭条件, 可以实现方向回溯功能。

从上述分析可以看出, VanAtta 天线阵之所以具有方向回溯功能, 主要由于互为成对的阵元因为空间位置的对称而满足广义相位共轭, 也可以说空间共轭决定了相位共轭。

2.2.2 相位共轭阵

相位共轭阵, 又称 PON 阵^[5], 是基于混频技术实现方向回溯的一种天线阵。阵列采用两倍射频本振, 对射频信号直接混频, 经混频后取下边带信号获得与射频频率相同但相位共轭的信号, 如图 3 所示。

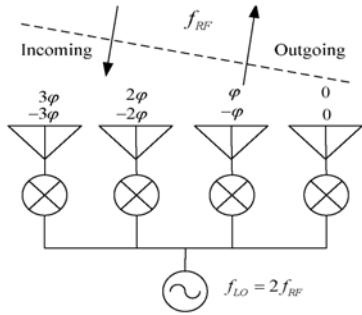


图 3 PON 阵

假设第 i 个天线单位接收的射频信号为 $V_{RF} \cos(\omega t + \varphi_i)$ ，本振信号为 $V_{LO} \cos(2\omega t)$ ，则中频信号 V_{IF} 为：

$$\begin{aligned} V_{IF} &= V_{RF} \cos(\omega t + \varphi_i) V_{LO} \cos(2\omega t) \\ &= \frac{1}{2} V_{RF} V_{LO} [\cos(3\omega t + \varphi_i) + \cos(\omega t - \varphi_i)] \end{aligned} \quad (6)$$

经混频后的信号由频率为 3ω 的上边带信号和频率为 ω 的中频信号组成，用射频 ω 带通滤波器滤波后，输出结果为：

$$V_{RFout} \xrightarrow{BPF} \cos(\omega t - \varphi_i) \quad (7)$$

可见，输出信号频率与输入信号频率相同，但相位共轭，每一个天线单元收发信号相位满足 $\varphi_i + (-\varphi_i) = 0$ ，这就实现了用超外差混频获得相位共轭从而实现方向回溯。

2.2.3 两者比较

VanAtta 阵和 PON 阵都满足广义相位共轭条件，具有方向回溯功能。VanAtta 阵利用空间共轭实现相位共轭，可在宽频带范围内实现方向回溯，其带宽仅受天线单元带宽的限制，其缺点是只能回溯平面波，难以与电子系统共形。而 PON 阵用混频技术实现相位共轭，既可利用有源混频器的转换增益，又可在混频后对回溯信号再处理达到传输信息的目的；同时 PON 阵可回溯非平面波，可应用到曲线表面系统中。

3 特性描述

方向回溯天线阵最主要特性是方向回溯性，该特性由波束指向误差 (Beam Point Error-BPE) 衡量。BPE 需要通过对天线阵的雷达散射截面 (RCS) 测量来确定。双站 RCS 主要用于考察天线阵的抗干扰能力、波束指向误差，单站 RCS 主要用于衡量方向

回溯天线阵的回溯角覆盖范围。下面理论推导方向回溯天线阵 RCS 理论表达式。

3.1 双站 RCS (BRCS)

如图 4 所示，在双站情况下，发射天线固定在某一个角度 (θ_0, ϕ_0) ，接收天线围绕着方向回溯天线转动接收回溯信号。

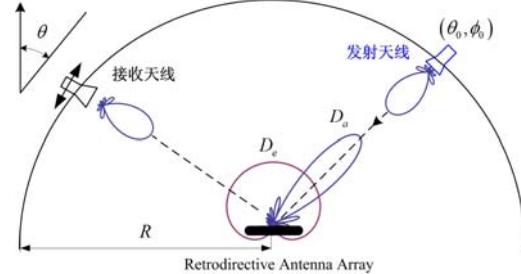


图 4 双站 RCS 测试

假设发射天线位于 (θ_0, ϕ_0) 且增益为 G_r ，发射功率为 P_r ，与方向回溯天线阵相距远场距离 R ，且极化完全匹配，则入射到方向回溯天线单元处的功率密度为：

$$S_i = \frac{P_r G_r}{4\pi R^2} \quad (8)$$

若方向回溯天线单元方向增益为 $D_e(\theta, \phi)$ ，有效口径为 A_e ，方向回溯阵系统电路增益 G_c ，则天线阵辐射功率为：

$$P_r' = G_c \frac{P_r G_r}{4\pi R^2} \frac{\lambda_0^2 D_e(\theta_0, \phi_0)}{4\pi} \quad (9)$$

若天线阵阵因子增益为 D_a ，则接收天线处的功率密度为：

$$S_s = \frac{P_r'}{4\pi R^2} D_e(\theta, \phi) D_a(\theta, \theta_0, \phi, \phi_0) \quad (10)$$

式中阵因子增益 D_a 由式 (11) 给出。

$$D_a = \frac{4\pi |F_a(\theta, \theta_0, \phi, \phi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F_a(\theta', \theta_0, \phi', \phi_0)|^2 \sin \theta' d\theta' d\phi'} \quad (11)$$

式中， $F_a(\theta, \theta_0, \phi, \phi_0)$ 是天线阵的阵因子。

结合式 (11) 可得出方向回溯天线阵的双站雷达散射截面表达式为：

$$\begin{aligned} \sigma_{bistatic}(\theta, \theta_0, \phi, \phi_0) &= \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_c D_e(\theta_0, \phi_0) \times \\ &\quad D_e(\theta, \phi) D_a(\theta, \theta_0, \phi, \phi_0) \end{aligned} \quad (12)$$

式中， λ_0 为测试频率对应的自由空间波长。

在双站 RCS 测试中，由于来波方向 (θ_0, ϕ_0) 固定，双站散射方向图随着角度 (θ, ϕ) 变化，阵因子的最大

方向在来波方向，所以双站散射方向图的主瓣在来波方向，由于阵列因子的作用还有零点和副瓣。

3.2 单站 RCS (MRCS)

在单站测试的情况下，收发天线同时扫描，如图 5 所示。与双站 RCS 推导类似，方向回溯天线阵辐射功率为：

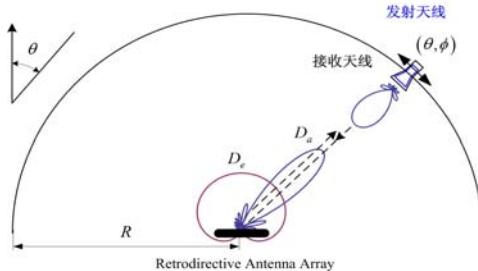


图 5 单站 RCS 测试

$$P'_R = G_c \frac{P_r G_r}{4\pi R^2} \frac{\lambda_0^2 D_e(\theta, \phi)}{4\pi} \quad (13)$$

则接收天线处的功率密度为：

$$S_s = \frac{P'_R}{4\pi R^2} D_e(\theta, \phi) D_a(\theta, \phi) \quad (14)$$

结合式 (14) 可获得方向回溯天线阵的单站雷达散射截面为：

$$\sigma_{monostatic}(\theta, \phi) = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_c D_e^2(\theta, \phi) D_a(\theta, \phi) \quad (15)$$

式 (15) 显示单站 RCS 由单元天线方向增益的平方乘阵因子增益获得。由于方向回溯阵的方向回溯特性，阵因子的峰值总是在来波方向（辐射源方向）， $D_a(\theta, \phi)$ 表达式见式 (16)。

$$D_a(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F_a(\theta', \phi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\phi'} \quad (16)$$

图 6 给出了以微带天线作为单元天线，阵元数为 8 的线阵，间距为半波长，来波方向为 30° 的单站和双站散射方向图曲线。从图可见单站散射方向图比较平坦，没有零点双站散射方向图主瓣在来波方向。

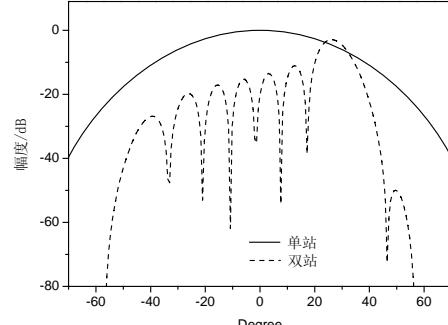


图 6 典型的单站和双站散射方向图

4 结论

本文在相位共轭条件的基础上首次提出了广义相位共轭条件，对 VanAtta 阵和 PON 阵这两种典型的方向回溯天线阵的工作原理做了统一的原理分析。文中比较了两者的优缺点，理论推导出了方向回溯阵的双站和单站雷达散射截面的表达式。为进一步研究方向回溯天线阵奠定了一定的基础。

参 考 文 献

- [1] Y.C.Guo,X.W.Shi,L.Chen. Retrodirective Array Technology[J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2008(5): 153-67.
- [2] Ieee Standard Definitions of Terms for Antennas[J]. IEEE Std 145-1993, 1993.
- [3] Putzer, E., Ghose, R. Redirective and Retrodirective Antenna Arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1969, 17(3): 276-79.
- [4] Atta, L. C. V. Electromagnetic Reflector[P]. US:2 908,1959.
- [5] Pon, C. Y. Retrodirective Array Using the Heterodyne Technique[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1964, 12(2): 176-80.

作者简介：

郭玉春，男，博士，主要研究领域现代天线系统理论与工程、射频/微波电路设计、新型电磁材料等；

张光生，男，高级工程师，主要研究方向为天线理论与工程，天线控制技术等；

周军，男，高级工程师，主要研究领域主要研究方向为有源天线、天线宽带匹配电路、射频前端等。

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>