

相位共轭天线阵研究

郭玉春^{1,2} 周军^{1,2} 张光生²

(1. 通信系统信息控制技术国家级重点实验室, 浙江嘉兴 314033;

2. 中国电子科技集团公司第三十六研究所, 浙江嘉兴 314033)

摘要: 基于广义相位共轭条件, 研究了相位共轭天线阵实现方向回溯功能的原理, 详细分析了射频混频和中频混频两种实现方式的工作方式并讨论了各自的优缺点。理论推导了相位共轭天线阵的远场表达式, 提出了射频泄漏系数的概念, 仿真研究了射频泄漏系数对方向回溯场的影响, 为方向回溯天线阵的进一步研究奠定了基础。

关键词: 方向回溯天线阵; 相位共轭阵; 混频器; 射频泄漏; 回溯场

Research on Phase-Conjugating Antenna Arrays

GUO Yu-chun^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2}, ZHANG Guang-sheng²

(1. National Laboratory of Information Control Technology for Communication System, Jiaxing, 314033, China;

2. No.36 Research Institute of CETC, Jiaxing, 314033, China)

Abstract: On the basis of the generalized phase conjugation condition, the principles of phase-conjugating arrays (PON) is theoretically studied and derived. The principles and the advantages and disadvantages of two typical PON antenna array of the realization of phase conjugation are analyzed and discussed. The far field expressions of phase-conjugating arrays are theoretically derived. The RF leakage coefficient is first proposed, and discussed the RF leakage coefficient on the impact of retrodirective far field. It lay a foundation for the further research of the retrodirective antenna array.

Key words: retrodirective array antenna; phase conjugating arrays; mixer; RF leakage; retrodirective field

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^[1-2]。方向回溯天线基于相位共轭技术实现自动波束跟踪, 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。

方向回溯天线是这样一种天线^[3]: 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。如果天线系统含有源器件用于增强返回信号, 则称为有源方向回溯天线。实现方向回溯功能主要有两种方式: 一种是 VanAtta 阵,

另外一种就是相位共轭阵。相位共轭阵(又称为 PON 阵)是目前采用天线阵形式实现方向回溯功能最主要的一种方式^[4], 相位共轭阵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, 而且 PON 阵还可回溯非平面波, 可以应用到曲线表面系统中, 从提出到现在获得了广泛的研究和应用^[5-8]。

本文首先介绍了相位共轭阵的基本概念, 然后采用广义相位共轭条件研究了相位共轭阵实现方向回溯功能的工作原理, 分析了 PON 阵的两种主要实现方式, 理论推导了相位共轭阵的远场表达式, 提出了射频泄漏系数的概念, 仿真研究了射频泄漏系数对方向回溯场的影响, 为方向回溯天线阵的进一步研究奠定了基础。

1 相位共轭阵

如图 1 所示, 在均匀各向同性媒质空间中, 任意布置 N 元天线阵。第 i 阵元离参考波前的距离为 L_i , ϕ'_i, ϕ_i 分别为第 i 个单元端口收发信号相

位, $\Delta\varphi_i$ 为第 i 路的延迟相位, β 为相位常数。

不同阵元的相位关系如图 1 所示。

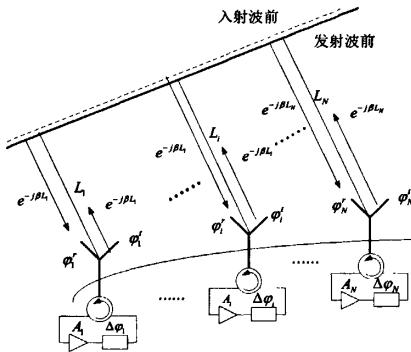


图 1 天线阵阵元的相位关系

为了利用天线阵实现方向回溯功能, 只要天线阵各单元端口收发信号满足广义相位共轭条件^[9]就可实现对任意方向的来波信号方向回溯, 且与来波方向无关, 从而实现阵列波束的自动跟踪。即:

$$\varphi'_i + \varphi'_i = C$$

式中, φ'_i , φ'_i 为第 i 阵元处入射和发射信号的相位, C 为常数。

假设入射波前为参考相位, $\varphi_{ref}=0$, 第 i 个阵元端口接收相位为 $-\beta L_i$, 通过移相 $\Delta\varphi_i$ 后在第 i 阵元输出端口的相位为 $-(\beta L_i + \Delta\varphi_i)$, 经过天线辐射到达入射波前, 其相位为: $-(2\beta L_i + \Delta\varphi_i)$, 因此可以获得第 i 个天线阵元的端口的收发相位之和为:

$$\varphi'_i + \varphi'_i = -\beta L_i + (-\beta L_i - \Delta\varphi_i) = C \quad (1)$$

不失一般性, 令 $C=0$, 求解(2)可以获得:

$$\Delta\varphi_i = -2\beta L_i \quad (2)$$

可见, 只要满足 $\Delta\varphi_i = -2\beta L_i$ 的移相功能, 那么图 1 所示的天线阵就能实现方向回溯功能, 入射波前和发射波前重合。同时, 由于每一个单元天线独立完成相位共轭, 当入射波为非平面波时也可以完成等相位面的重构, 即实现方向回溯, 信号时间反演。

2 实现方式

实现 $\Delta\varphi_i = -2\beta L_i$ 的移相功能在微波领域通

常采用混频器来实现, 如果采用有源混频器可以为相位共轭信号提供混频转换增益, 减少功率放大器增益或者去掉放大器。一般有两种实现方法。一种是中频混频相位共轭技术, 另外一种是射频混频相位共轭技术。

2.1 中频混频

如图 2 所示, 图中天线为同一个天线单元, 基于中频混频实现相位共轭的基本思想是: 接收的信号首先用高本振 (Freq=RF+IF) 下变频到中频 (IF), 滤波器过滤 $2\omega_{RF} + \omega_{IF}$ 信号, 然后将中频信号用低本振 (Freq=RF-IF) 上变频到射频 (RF), 经带通滤波器获得上边带信号, 该信号与来波信号相位共轭。

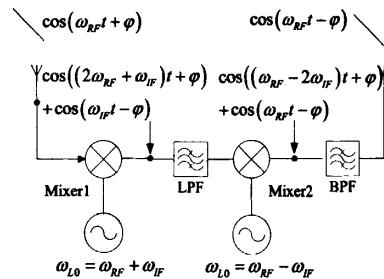


图 2 中频混频相位共轭

设定载波信号为 $V_{RF} \cos(\omega_{RF}t + \varphi)$, 本振信号为

$V_{LO1} \cos(\omega_{LO1}t)$, 下变频后经过低通滤波器, 则中频信号输出为:

$$\begin{aligned} V_{IF} &= V_{RF} \cos(\omega_{RF}t + \varphi) V_{LO1} \cos(\omega_{LO1}t) \\ &= \frac{1}{2} V_{RF} V_{LO1} \{ \cos((2\omega_{RF} + \omega_{IF})t + \varphi) + \cos(\omega_{IF}t - \varphi) \} \quad (3) \\ &\stackrel{LPE}{\Rightarrow} \cos(\omega_{IF}t - \varphi) \end{aligned}$$

中频信号 V_{IF} 与二本振 $V_{LO2} \cos(\omega_{LO2}t)$ 混频后, 经过带通滤波器, 回溯射频信号为:

$$\begin{aligned} V_{RF} &= V_{IF} \cos(\omega_{IF}t - \varphi) V_{LO2} \cos(\omega_{LO2}t) \\ &= \frac{1}{2} V_{IF} V_{LO2} (\cos((\omega_{RF} - 2\omega_{IF})t + \varphi) + \cos(\omega_{RF}t - \varphi)) \quad (4) \\ &\stackrel{BPF}{\Rightarrow} \cos(\omega_{RF}t - \varphi) \end{aligned}$$

式(4)和式(5)显示, 回溯射频信号

$\cos(\omega_{RF}t - \varphi)$ 与射频来波信号 $\cos(\omega_{RF}t + \varphi)$ 互为相位共轭，满足相位共轭条件。图 3 给出了中频混频相位共轭过程的频谱搬移过程。

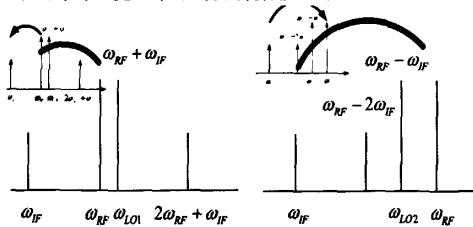


图 3 中频混频相位共轭频谱搬移过程

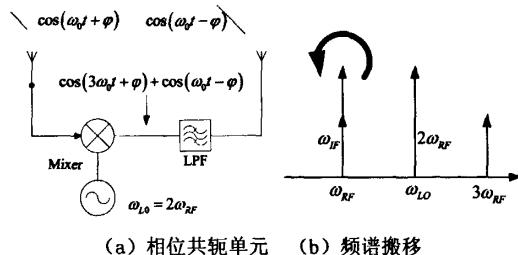
2.2 射频混频

对射频信号直接混频实现相位共轭的基本思想是：当本振（LO）频率是射频（RF）频率的两倍时，混频后低边带信号具有与 RF 相同的频率，但相位与射频信号共轭。将该方法应用与天线阵，通过两倍本振与每个天线单元的接收信号混频，获得共轭相位信息后，利用这一共轭相位信息就能自动跟踪来波方向，如图 4(a)所示。

设定载波信号为 $V_{RF} \cos(\omega t + \varphi)$ ，本振信号为

$V_{LO} \cos(2\omega t)$ ，则中频信号为：

$$\begin{aligned} V_{IF} &= V_{RF} \cos(\omega t + \varphi) V_{LO} \cos(2\omega t) \\ &= \frac{1}{2} V_{RF} V_{LO} (\cos(3\omega t + \varphi) + \cos(\omega t - \varphi)) \end{aligned} \quad (5)$$



(a) 相位共轭单元 (b) 频谱搬移

图 4 射频混频相位共轭及频谱搬移过程

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，用载频 ω 带通滤波器滤波后，输出结果为：

$$\begin{aligned} V_{RFout} &= V_{IF} [\cos(3\omega t + \varphi) + \cos(\omega t - \varphi)] \\ &\xrightarrow{BPF} \cos(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

从式(7)可以看出，输出信号频率与输入信号频率相同，但相位共轭。上述两种方法，对每一个天线单元都满足广义相位共轭式(1)。但实际应用中，通常为了测试方便和增加天线端口的收发隔离度，一般有意设计使得 RF 和 IF 有一定的频

偏。在 RF 和 IF 频率不相同的情况下接收和辐射的电磁波构成广义相位共轭波^[9]，这一频偏将引起波束指向误差，一般选择高收低发可以利用单元天线引起的波束指向误差抵消一部分频偏引起的波束指向误差。

2.3 两种方式的区别

中频混频和射频混频两种方式实现相位共轭各有优缺点。中频混频容易实现通信功能并与现有的接收机系统结合。但是由于采用了两个混频器，增加了系统成本，如果采用无源混频器，信号衰减过大，需要中频放大器；采用有源混频器虽然可以获得变频增益，但有源电路必然带入附加的噪声，对系统性能也有影响，需要系统考虑。

利用射频混频实现相位共轭这一方法最重要的是对射频泄漏信号的抑制，消除不需要的非共轭信号（泄漏 RF 信号），只留下需要的相位共轭信号。因为下边带信号和本振泄漏信号通过滤波器很容易排除，但非共轭信号和 IF 信号的频率相同而相位非共轭，不可能用滤波器来区分两个信号。非共轭信号将按照 Snell 定律确定的方向被再次辐射出去，造成方向图的畸变。另外，射频混频相比较而言成本较低，由于本振必须为来波频率的两倍，这样限定了系统工作带宽；而且如果射频频率比较高，本振工作频率更高，不易实现，需采用次谐波混频来解决这一问题^[10]。

3 相位共轭阵列特性

3.1 理论回溯场

相位共轭阵列理论上可以是任意单元数目，假设采用双极化微带天线作为天线单元，阵元数为 N 的偶数线阵。阵元位于 x 轴，相位共轭电路可以放置于微带天线地板，这种相位共轭阵使用最为普遍。如图 5 所示。

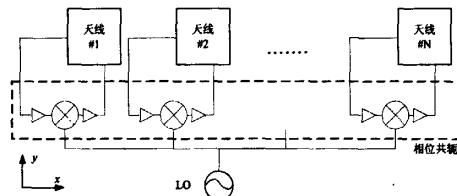


图 5 相位共轭阵

根据天线原理，如图 6，远区总的回溯场为：

$$E_{RDA} = g(\theta_i) \sum_{i=-N/2}^{N/2} I_i e^{j\psi_i} \times \exp[j(\beta x_i (\sin \theta_i - \sin \theta_r))] \quad (7)$$

式中, I_i 为单元天线激励, ψ_i 为每个单元由于相位共轭电路引起的相位延迟, θ_i 为入射角, θ_i 为方向回溯角, $g(\theta)$ 为单元天线的方向图, x_i 为第 i 个单元离阵列中心的距离。

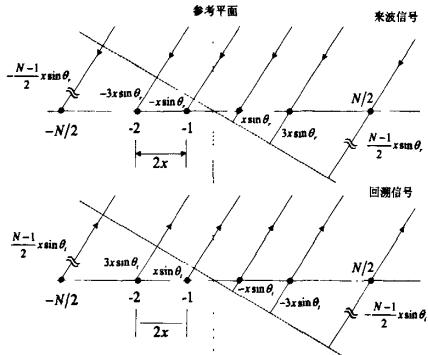


图 6 PON 阵接收和发射状态

如采用射频混频, 混频器隔离度有限, 那么射频泄漏会引起方向图畸变, 这样每个混频器输出都包含相位共轭信号和 RF 泄漏信号, 定义一个表征混频泄漏的大小量 κ_i 为射频泄漏系数:

$$\kappa_i = \frac{B_i}{A_i} \quad (8)$$

式中, A_i 和 B_i 为共轭信号和泄漏信号的幅度, 该值中包括了放大器增益, 混频器和传输线的损耗。如果一致性较好的话, 可以认为 $\kappa = \kappa_i$ 为一个常数。

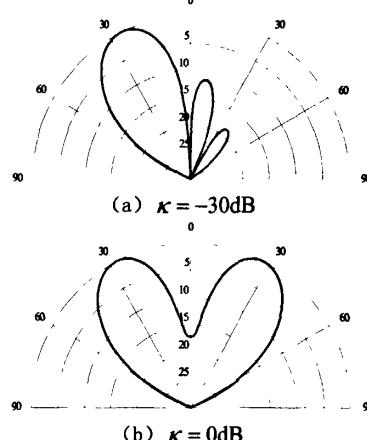
考虑射频泄漏后的回溯场为:

$$E_{RDA} = g(\theta_i) \sum_{i=-N/2}^{N/2} A_i \left\{ e^{j(\beta x_i (\sin \theta_i - \sin \theta_r) - \psi_i)} + \kappa_i e^{j(\beta x_i (\sin \theta_i + \sin \theta_r) + \psi_i)} \right\} \quad (9)$$

3.2 回溯场分析

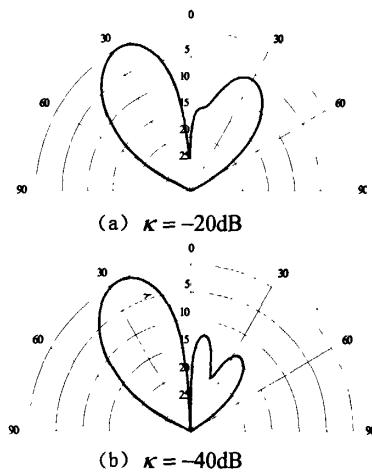
考虑 16 (1×16) 单元双极化微带相位共轭线阵, 设定 $\theta_r = 30^\circ$, $\psi_i = 0$, $\kappa = -30 \text{ dB}$, $\kappa = 0 \text{ dB}$ 的回溯场方向图如图 7 所示。从图可以看出, 射频泄漏越大, 副瓣电平越高, 波束指向误差越大。当相位共轭信号与泄漏信号比值相同时, 波束出现了与回溯波束相同的镜像波束, 增益严重下降。 $\kappa = -30 \text{ dB}$ 时, 波束指向误差为 5° , 这个误差包

括了由阵列的单元个数引起的误差。

图 7 κ 对波束的影响

括了由阵列的单元个数引起的误差。

在射频泄漏情况下 ψ_i 对波束也有影响。设定 $\psi_i = \pi/4$, κ 分别为 -20 dB , -40 dB , 方向图如图 8 所示。在低隔离度的情况下, 方向图副瓣大幅度提升, 而在高隔离度的情况下则 ψ_i 对方向图的影响较小, 两者只有 1 度的差别, 而且趋向于与 ψ_i 无关。

图 8 ψ_i 对波束的影响

4 结论

相位共轭阵由于其独特的特性获得了广泛的应用。本文在广义相位共轭条件的基础上研究了相位共轭阵实现方向回溯功能的工作原理, 对 PON 阵的两种实现方式进行了详细分析, 理论推

导了相位共轭阵的远场表达式，并提出了射频泄漏系数的概念。仿真研究了射频泄漏系数对方向回溯场的影响，为方向回溯天线阵的进一步研究奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Shiroma, W. A., Miyamoto, R. Y., Shiroma, G. S., *et al.* Progress in retrodirective arrays for wireless communications[J]. IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology, 2003: 80-81.
- [2] Leong, K. M. K. H., Miyamoto, R. Y., Itoh, T. Moving forward in retrodirective antenna arrays[J]. IEEE Potentials, 2003, 22(3): 16-21.
- [3] IEEE standard definitions of terms for antennas[J]. IEEE Std 1993!1:145-1993..
- [4] Pon, C. Y. Retrodirective array using the heterodyne technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1964, 12(2): 176-80.
- [5] Goshi, D. S., Leong, K. M. K. H., Itoh, T. Recent advances in retrodirective system technology[C]. IEEE Radio and Wireless Symposium, 2006: 459-62.
- [6] Goshi, D. S., Leong, K. M. K. H., Tatsuo, I. A Scheme for Hardware Reduction in Wireless Retrodirective Transponders[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2006: 626-29.
- [7] Chiu, L., Yum, T. Y., Chang, W. S., *et al.* Retrodirective array for RFID and microwave tracking beacon applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(2): 409-11.
- [8] Goshi, D., Leong, K., Itoh, T. A Retrodirective Array with Interference Rejection Capability[J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest., 2005, 1: 395-98.
- [9] 郭玉春. 方向回溯天线阵研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [10] Brabetz, T., Fusco, V. F., Karode, S. Balanced subharmonic mixers for retrodirective-array applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(3): 465-69.

郭玉春 男, 1974 年生, 博士。主要研究方向: 现代天线系统理论与工程、射频/微波电路设计、新型电磁材料研究、计算电磁学等。

E-mail: gyc_cn@126.com

周军 男, 1967 年生, 高级工程师, 主要研究方向: 有源天线、天线宽带匹配电路、射频前端等。

张光生 男, 1974 年生, 高级工程师, 主要研究方向: 天线理论与工程, 天线控制技术等。

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>