

数字阵列天线接收通道宽带信号校准与波束形成技术研究

陈文俊^{1,2}, 王 建², 聂在平¹

(1. 电子科技大学电子工程学院, 四川成都 611731; 2. 南京船舶雷达研究所, 江苏南京 210003)

摘要: 本文提出了一种简洁、实用的天线接收通道宽带信号校准方法. 该方法采用零中频信号处理技术, 通过理论分析将数字阵列天线接收通道宽带线性调频信号校准分为通道间的时间和相位校准, 证明了接收通道间宽带线性调频信号相位校准可以转化为单频信号进行, 给出了接收通道间宽带信号的幅度校准方法和时间校准允许的误差范围. 在通道校准基础上, 采用脉冲压缩技术合成了宽带天线方向图. 实验结果表明, 本文方法是有效、可行的.

关键词: 数字阵列天线; 宽带信号; 通道校准; 数字波束形成

中图分类号: TN827 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0582-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.027

Study on the Calibration of Receiving Channels and the Beamforming Technology for Wideband Digital Array Antennas

CHEN Wen-jun^{1,2}, WANG Jian², NIE Zai-ping¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 611731, China;
2. Nanjing Marine Radar Institute, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: A simple and practical method for the calibration of digital array's receiving channels is proposed. Theoretical analysis demonstrates that the LFM signal of zero intermediate frequency synchronization among the different receiving channels of an antenna depends on their phase and time calibration. The phase calibration of a wideband LFM signal in receiving channels can be converted into the calibration of a single frequency's. The method of its amplitude calibration and the required measurement precision of the relative delays for receiving channels calibration are also derived. A wideband beamforming procedure is developed by using pulse compression based on channels calibration. The experimental results prove that the method is effective.

Key words: digital array antenna; wideband signal; channel calibration; digital beamforming

1 引言

数字波束形成技术是通过数字方式补偿不同接收通道间信号的时间和相位差, 使各接收通道信号同相叠加, 在特定方向接收能量最大. 然而, 由于天线单元间互耦、阵元位置误差、信号传输通道长度不同以及时钟信号不同步等因素导致不同接收通道时间、相位不同, 造成天线方向图畸变. 因此, 通道校准是宽带数字波束形成的前提.

国内外有不少学者开展了对数字阵列天线校准和波束形成的相关研究. 文献[1]利用通道均衡技术实现了数字阵列天线接收通道工作频带内不同频点的校准. 文献[2]给出了利用方向图检测通道幅相误差的方法. 文献[3]通过测量数字天线接收通道内幅度和相位, 分别采用内、外校准法实现了天线接收通道校准和波束形

成, 但这些工作只适用于单频信号. 文献[4~7]分别从不同角度给出了宽带波束形成的方法, 但都没有具体讨论宽带信号接收通道的校准问题. 文献[8]基于 dechirping 技术, 采用数字抽取技术和 FFT 算法, 仿真研究了宽带数字阵列雷达时延测量方法. 文献[9, 10]研究了采用分数时延滤波器实现宽带数字信号延时的技术. 这些研究成果为实现宽带数字天线的接收通道校准和波束形成奠定了理论基础, 但没有形成系统的、适合工程应用的方法.

本文针对宽带线性调频信号的特点, 将数字阵列天线接收通道宽带线性调频信号校准的关键步骤通道间信号对齐, 分解为时间和相位校准两部分完成, 推导出了宽带线性调频信号相位和幅度校准公式, 给出了实现天线瞬时宽带方向图的步骤和方法, 并用实验结果验证了这些方法.

2 宽带数字阵列天线校准

2.1 带时延的零中频线性调频信号模型

零中频信号处理的基本思路是:采用二次混频方案将射频宽带线性调频信号降为零中频信号,即先用本振信号将微波信号降到中频信号,对中频信号进行 A/D 采样,接着进行 L/Q 正交数字下混频,经低通滤波后变成零中频信号。

假设接收通道是理想的,天线阵中某一单元的接收通道与参考通道相对时间延迟为 t_{0i} , i 为通道号,则该通道内线性调频信号可表示为:

$$y = \cos(2\pi f_0(t - t_{0i}) + \pi B(t - t_{0i})^2), -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1)$$

式中 f_0 为线性调频信号的载频(本文为中心频率), $B = \frac{\Delta f}{T}$ 为调频斜率, Δf 为线性调频信号的带宽, T 是信号脉冲宽度。

本振信号为:

$$y_L = \cos(2\pi f_{L0}(t - t'_i)) \quad (2)$$

其中 f_{L0} 为本振频率, t'_i 为本振信号到接收通道的时间延迟。

将微波输入信号与本振信号混频,输出信号变为:

$$S = y * y_L = \frac{1}{2} (\cos(2\pi f_0(t - t_{0i}) + \pi B(t - t_{0i})^2 + 2\pi f_{L0}(t - t'_i)) + \cos(2\pi f_0(t - t_{0i}) + \pi B(t - t_{0i})^2 - 2\pi f_{L0}(t - t'_i))) \quad (3)$$

经过低通滤波后信号变为:

$$S = \cos(2\pi(f_0 - f_{L0})t - 2\pi f_0 t_{0i} + 2\pi f_{L0} t'_i + \pi B(t - t_{0i})^2) \quad (4)$$

令 $f_0 - f_{L0} = f_1$, 采样附加时延为 t''_i , 则 A/D 采样后输出信号为:

$$S_{AD} = \cos(2\pi f_1(t - t''_i) - 2\pi f_0 t_{0i} + 2\pi f_{L0} t'_i + \pi B(t - t_{0i} - t''_i)^2) \quad (5)$$

此时 $t = mt_s$, t_s 为采样周期, m 为采样点数。对(5)式进行正交混频:

$$\begin{aligned} I &= S_{AD} * \cos(2\pi f_1 t) \\ &= \frac{1}{2} (\cos(4\pi f_1 t - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i} + 2\pi f_{L0} t'_i + \pi B(t - t_0 - t''_i)^2) + \cos(2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i} + \pi B(t - t_0 - t''_i)^2)) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q &= -S_{AD} * \sin(2\pi f_1 t) \\ &= -\frac{1}{2} (\sin(4\pi f_1 t - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i} + 2\pi f_{L0} t'_i + \pi B(t - t_{0i} - t''_i)^2) + \sin(2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i} + \pi B(t - t_{0i} - t''_i)^2)) \end{aligned} \quad (7)$$

经低通滤波后,信号 $S = I + jQ$ 变为零中频信号:

$$S = \cos(2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i} + \pi B(t - t_{0i} - t''_i)^2) + j * \sin(2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i} + \pi B(t - t_{0i} - t''_i)^2) = e^{j\varphi_1} e^{j\pi B(t - T_{0i})^2} \quad (8)$$

式中 $\varphi_1 = 2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i}$, $T_{0i} = t_{0i} + t''_i$ 。

2.2 时间延迟测量

本文采用文献[8]的方法测量通道间时间延迟,下列公式的具体推导过程可以参考原文献。为了降低数据率和提高测量精度,将(8)式表示的线性调频信号 D 倍抽取:

$$S = e^{j\varphi_1} e^{j\pi B(mT'_s - T_{0i})^2} \quad (9)$$

其中 $T'_s = Dt_s$ (D 为抽取率)。

选取参考信号:

$$S_{\text{ref}} = e^{j\pi B(mT'_s - \tau_0)^2} \quad (10)$$

其中 τ_0 为设定的时延,且为采样周期 t_s 的整数倍。注意,它是为了求各通道的时延而设定的信号,与天线系统接收参考通道的信号不同。将信号 S 与参考信号 S_{ref} 共轭相乘:

$$X = SS_{\text{ref}}^* \quad (11)$$

对上式做傅里叶变换后,可推导出待测通道内线性调频信号时间延迟的解析表达式为:

$$T_{0i} = -\left(\frac{f_n}{B} + \tau_0\right) \quad (12)$$

式中 f_n 为对(11)式做 FFT 求出的幅度最大值对应的频率, τ_0 、 B 为已知参数。从 T_{0i} 表达式可以看出,通道时延与天线工作带宽 Δf 无关,可采用调频斜率和载频都相同的窄带线性调频信号求通道的宽带线性调频信号时延。

上述方法可以求出数字阵列天线任一接收通道内线性调频信号与参考信号 S_{ref} 间相对时延。在此基础上,可进一步求出数字阵列天线接收通道间宽带信号的相对时延。

2.3 相位和幅度校准

若数字阵列天线工作在点频 f_0 , 则(8)式变为:

$$S = \cos(2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i}) + j * \sin(2\pi f_{L0} t'_i - 2\pi f_1 t''_i - 2\pi f_0 t_{0i}) \quad (13)$$

信号 S 的幅度和相位,可由下列公式求出:

$$\varphi = \text{atan} \frac{Q}{I} \quad (14)$$

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (15)$$

φ 为接收通道信号的相位, A 为接收通道信号的幅度。据此,可实现对工作在点频条件下的天线校准和波束合成^[3]。

用类似于文献[11]的推导方法,可得出(8)式表示的线性调频信号脉冲压缩后,输出的时域信号表达式为:

$$S_0 = \sqrt{D} \frac{\sin(\pi\Delta f(t - T_{0i}))}{\pi\Delta f(t - T_{0i})} e^{j(2\pi f_{0i}t' - 2\pi f_i t'' - 2\pi f_0 t_{0i})} \quad (16)$$

式中 $D = T\Delta f$ 为时宽-带宽积, $T_{0i} = t_{0i} + t''_i$ 为通道总时延. 显然, 脉压后线性调频信号相位与(13)式表示的点频信号相位相同, 线性调频信号的相位校准转化成点频 f_0 信号的相位校准. 幅度最大值为点频信号的 \sqrt{D} 倍, 幅度瞬时值与时延 T_{0i} 有关.

式(9)表示的线性调频信号相位项中 φ_1 可以通过数字移相器补偿, 但平方相位项与时间有关, 不能通过移相器补偿. 为了使其与参考通道输出信号的相位一致, 采用分数延迟滤波器将信号时间延迟 $T_0 - T_{0i}$. 这样两个通道信号的时间、相位完全对齐, 此时参考通道和第 i 个接收通道输出信号脉压后, 时域表达式都变成:

$$S_0 = \sqrt{D} \frac{\sin(\pi\Delta f(t - T_0))}{\pi\Delta f(t - T_0)} \quad (17)$$

至此, 两个通道间相对幅度与 T_{0i} 无关, T_0 为参考通道时延, 已选取时延最大的通道作为参考通道. 通道间线性调频信号的幅度校准也转换为点频 f_0 信号的幅度校准.

2.4 信号校准对时延测量精度的要求

接收通道信号数字化过程中由于 A/D 抖动、时钟不完全同步等因素造成通道间时延测量存在误差, 接收通道间的时延误差会对天线方向图产生影响, 因此应研究不同通道间信号对齐允许存在的时延误差范围.

相控阵雷达天线要求其天线辐射单元 3dB 波宽能覆盖其整个扫描范围. 参照该要求, 天线接收通道与参考通道间信号交点应不小于 3dB. 参考通道的绝对时延为 T_0 , 假定第 i 路接收通道校准后时延为 T_i . 根据式(16), 若通道间相位已校准, 则 T_i 应符合符合下式:

$$0.7 \frac{\sin(\pi\Delta f(t - T_0))}{\pi\Delta f(t - T_0)} = \frac{\sin(\pi\Delta f(t - T_i))}{\pi\Delta f(t - T_i)} \quad (18)$$

可求得

$$T_i = T_0 \pm \frac{1.4}{\pi\Delta f} \quad (19)$$

因此, 各接收通道与参考接收通道间允许存在的时延误差 ΔT_e 应满足:

$$-\frac{1.4}{\pi\Delta f} \leq \Delta T_e \leq \frac{1.4}{\pi\Delta f} \quad (20)$$

3 数字阵列天线宽带波束形成方法

天线宽带方向图是天线系统在每一个测量角度, 对接收到的一个脉冲宽带线性调频信号进行脉冲压缩处理后, 取其幅度(或功率)最大值绘制而成的. 对瞬时宽带雷达系统而言, 宽带天线方向图更具参考意见.

假设有单元间距为 d 的 N 单元线阵, 数字阵列天线宽带线性调频信号的波束形成方法和步骤如下:

① 在阵列中选取一个参考通道, 用线性调频信号的载频 f_0 测量天线阵各接收通道与参考通道间的相位差 φ_{0i} 和相对幅度 A_i ;

② 对接收通道的线性调频信号进行零中频处理, 测量各通道间信号的时间延迟 T_{0i} ;

③ 用数字移相器补偿各通道信号与参考通道间初始相位差 φ_{0i} , 用 A_i 校准幅度, 用分数延迟滤波器补偿通道间信号的时延;

④ 补偿各接收通道与参考通道间的孔径渡越时间和相位差;

⑤ 合成各通道信号:

$$S = \sum_{i=1}^N A_i S_{0i}(t - T_{0i} - t_{di}) e^{2\pi f_0 t_{di}} e^{-\varphi_{0i}} \quad (21)$$

其中 $t_{di} = \frac{d(i-1)\sin\theta}{c}$ 为第 i 个天线单元与参考天线单元间的孔径渡越时间, $S_{0i}(t - T_{0i} - t_{di})$ 为第 i 个接收通道经过时间校准后的信号, c 是光速, θ 是入射波角度.

⑥ 对合成信号 S 进行脉冲压缩, 并取其幅度最大值;

⑦ 在不同测量角度重复上述过程并绘图, 即可形成数字阵列天线的宽带方向图.

4 实验结果

为了验证线性调频信号的对齐校准可以分解为时间和相位校准, 选择了宽带数字阵列天线的两个接收通道信号进行了校准. 该数字阵列天线的工作带宽为 200MHz, A/D 采样率为 500MHz, 脉冲宽度 $T = 80\mu\text{s}$, 载频 $f_0 = 3200\text{MHz}$, 调频斜率 $B = 2.5 \times 10^{12}\text{s}^{-2}$. 测量天线接收通道间时延的线性调频信号带宽为 40MHz, 载频 $f_0 = 3200\text{MHz}$, 调频斜率 $B = 2.5 \times 10^{12}\text{s}^{-2}$. 测量通道间相位差用的是与线性调频信号载频相同的单频信号. 图 1 为未经校准的零中频后两个通道信号的关系, 图 2 为只校准了相位的两个接收通道间信号的关系, 图 3 为只校准了时间的两个接收通道间信号的关系. 可以看出, 三种情况下两个接收通道间的信号都没有对齐. 图 4 为同时校准了时间和相位, 此时两个接收通道间的信号波形较为一致, 实现了通道间信号的对齐校准. 为了从图中清楚得看出校准效果, 绘图时只取了单个脉冲的一段数据.

为了验证本文提出的天线宽带波束形成方法的正确性, 利用暗室内远场天线测量系统, 测量了一个 8 单元数字阵列天线宽带方向图. 天线单元为微带振子, 单元间距为 6cm. 测量用线性调频信号带宽为 40MHz, 脉冲宽度 $T = 10\mu\text{s}$, 载频(中心频率) $f_0 = 3105\text{MHz}$, 调频斜

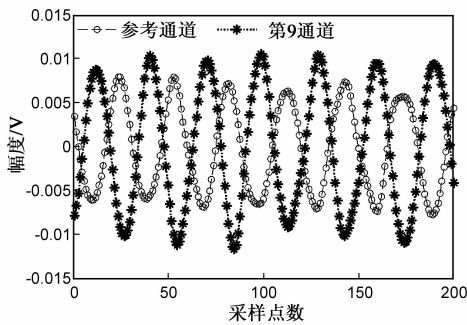


图1 零中频后的原始数据

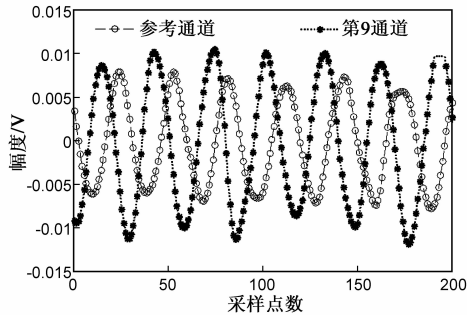


图2 相位校准后的数据

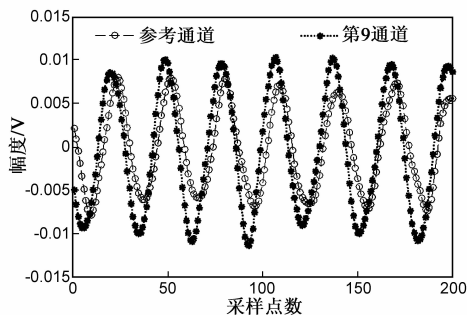


图3 时间校准后的数据

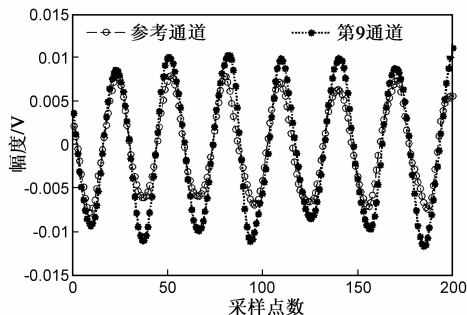


图4 时间和相位校准后的数据

率 $B = 4 \times 10^{12} \text{ s}^{-2}$, 接收组件采样率为 100 MHz . 发射信号位于远场, 用本文方法可以校准包含天线单元互耦在内的各接收通道的不一致性. 天线通道校准之后, 按照上一节宽带波束形成步骤处理, 可测出该天线系统的宽带方向图. 图 5 为实测数字阵列天线宽带方向图和中心频率仿真的理论方向图, 可以看出二者符合较好. 图中仿真结果为不考虑天线单元间互耦, 在 3105 MHz 计算出来的天线方向图.

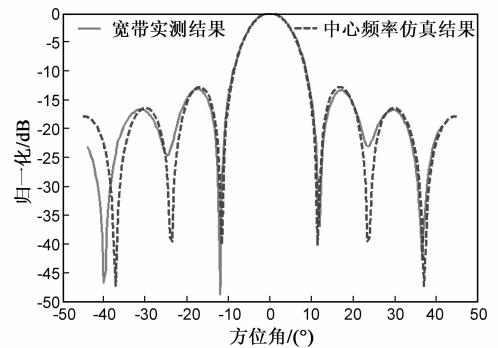


图5 实测宽带方向图与仿真结果比较

5 结论

理论分析结果表明采用数字零中频技术, 接收通道的线性调频信号脉冲压缩后, 幅度与时间延迟 T_{0i} 有关, 相位与时延 T_{0i} 无关, 因而可以将数字阵列天线不同接收通道的宽带信号对齐校准分为时间校准和相位校准. 在时延校准的基础上, 通道间宽带线性调频信号的幅度差可转换为载频信号的幅度差校准.

实验结果表明, 用窄带信号求通道内宽带信号时延以及用单频信号相位校准宽带信号相位的方法, 便于工程应用; 本文给出的接收通道时间校准允许的误差范围, 对确定测量通道间相对时延精度具有重要的指导意义. 另外, 实验结果还表明本文给出的数字阵列天线宽带波束形成方法是正确的.

参考文献

- [1] 王雨阳. 数字波束形成中的接收通道校正技术研究[J]. 现代电子技术, 2008, 5: 25 - 27.
Wang Yu-yang. Research on calibration method for receiving channel in DBF[J]. Modern Electrical Technology, 2008, 5: 25 - 27. (in Chinese)
- [2] 谢良贵. 数字波束形成技术的工程应用问题[J]. 电子学报, 1995, 23(10): 105 - 109.
XIE Liang-gui. Application problem about digital beamforming technology in radar engineering[J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(10): 105 - 109. (in Chinese)
- [3] 陈文俊, 胡永君. 数字阵列天线接收波束形成方法及实验研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 66 - 69.
Chen Wen-jun, Hu Yong-jun. A study on beamforming method of digital receiving array antenna and its experiment[J]. Modern Radar, 2011, 33(2): 66 - 69. (in Chinese)
- [4] Kiyoshi Nishikawa, Toshi Yamamoto, et al. Wideband beamforming using fan filter[J]. IEEE International Symposium on Circuit and Systems, 1992, 2(5): 533 - 536.
- [5] H Wang, M Kaveh. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wideband sources[J]. IEEE ASSP Mag, 1985 33(4): 823 - 831.

- [6] Huiping Duan, Boon Poh Ng, Chong Meng Samson See, Jun Fang. Broadband beamforming using TDL-Form IIR filters[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2007, 55(3): 990 – 1002.
- [7] 范立杰, 张月, 陈曾平. 数字阵列雷达宽带波束形成实现技术研究[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 61 – 64.
Fan Li-jie, Zhang Yue, Chen Zeng-ping. Study on broadband beamforming implementation technology of DAR [J]. Signal Processing, 2009, 25(8): 61 – 64. (in Chinese)
- [8] 彭卫, 汪学刚, 等. 基于 Dechirping 技术的宽带全数字阵列雷达时延测量方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 32 – 37.
Peng Wei, Wang Xue-gang, et al. A method of relative delay measurement for the wideband digital array radar based on dechirping technique [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 32 – 37. (in Chinese)
- [9] 胡永君, 陈文俊. 基于分数时延滤波器的宽带数字信号时延的实现[J]. 雷达与对抗, 2010, 30(2): 37 – 40.
Hu Yong-jun, Chen Wen-jun. The implementation of time delay based on fractional delay filters for wideband digital signals [J]. Radar & ECM, 2010, 30(2): 37 – 40. (in Chinese)
- [10] 马令坤, 黄建国, 谢达. 宽带数字信号精确时延实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(15): 158 – 160.

Ma Ling-kun, Huang Jian-guo, Xie Da. Implementation of wide band digital signal accurate time delay[J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(15): 158 – 160. (in Chinese)

- [11] 张明友, 汪学刚. 雷达系统[M]. 电子工业出版社, 北京, 2006: 259 – 262.
Zhang Ming-you, Wang Xue-gang. Radar System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, Beijing, 2006. 259 – 262. (in Chinese)

作者简介



陈文俊 男, 1970 年生于安徽省怀宁县, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达系统和天线微波技术。
E-mail: wjchen-aq@163.com

王建 男, 1958 年生于福建省福州, 研究员, 主要研究方向为雷达系统。

聂在平 男, 1946 年生于陕西西安, 电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向为计算电磁学、天线理论和技术。