

一种减小数字阵雷达非线性相关的方法

刘波, 韩春林, 何子述

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 对非线性阵列相关问题进行分析, 提出了一种新的非线性去相关技术来提高数字阵瞬时动态范围。该方法主要在接收机中利用了方向相反的两级相移, 第一级在接收机前端, 第二级在数字部分。理论分析表明利用该方法能有效地去相关杂散、互调失真等各种非线性, 从而最大限度地提高系统的瞬时动态范围。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词 去相关; 数字阵; 数字波束形成; 动态范围; 非线性
中图分类号 TN911.72 文献标识码 A

A Novel Method for Mitigating Nonlinear Correlation in Digital Arrays

LIU Bo, HAN Chun-lin, HE Zi-shu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The nonlinear correlation problems for digital arrays are analyzed in this paper. Then a novel approach is proposed to increase the Instantaneous Dynamic Range (IDR) levels for digital arrays. The method mainly employs two different direction phase shifts. The theoretical analysis of the proposed method shows that dynamic range enhancement can be achieved through the use of the method and decorrelation of spurs, phase noise, and various intermodulation products. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words decorrelation; digital arrays; digital beamforming; dynamic range; nonlinearities

瞬时动态范围(Instantaneous Dynamic Range, IDR)用来描述雷达检测强干扰信号中弱目标的能力, 雷达和一些射频系统设计经常要满足较高的IDR标准。数字阵雷达(Digital Arrays Range, DAR)利用多个数字接收机, 每个接收机连接到单个阵元(或子阵)后, 波束形成(Digital Beam Forming, DBF)^[1]在接收机之后执行, 进入单个接收机的最大信号电平相对较小, 和模拟阵列相比可降低单个接收机的IDR。虽然DBF的目的是只对相应的信号产生阵列增益, 以增加信号相对于背景噪声的强度。然而, T/R模块中器件的非线性失真在通道间是相关的, 也会产生阵列处理增益。如果DBF后的非线性失真水平超过了噪声基底, 则系统IDR的改善很小, 甚至为零。

以下的方法可以减小非线性, 提高系统IDR:
(1) 传统的方法。可以选择更好的、更合适的器件, 如高线性度的LNA及混频器、高精度的ADC及低相噪的振荡器, 不仅昂贵, 而且受限于器件的发展水平。对于大的阵列, 该方法更难以达到要求。(2) 为线性化技术^[2-4]。在接收时, 对失真进行线性化后处理, 通过数字均衡滤波器进行实现。它是采用自适

应的方法来减小某种类型的非线性, 但是不适用于所有的失真类型, 并且计算量非常大。(3) 为去相关技术。应用该技术, 可以减小有源阵天线功放的非线性, 如果模块与模块的失真去相关, 则不会产生阵列处理增益, 使DAR获得理想的IDR改善^[5]。(4) 类似于去相关技术。通过修改本振(LO)使雷达的ADC失真减小, 只针对单个阵元^[6]。

本文将去相关技术运用于DAR系统中, 利用两级相移来改善数字阵的非线性相关。

1 数字阵的非线性

数字阵由多个T/R模块组成^[7], 如图1所示。每个接收机连接阵元(或子阵), 用来对阵元(或子阵)接收的信号进行放大、滤波、解调及采样。各个接收机采样后的输出数字信号通过DBF进行相干合成。

在理想情况下T/R模块中的收发链路为线性, 但实际上, 所有的接收机都由近似为线性的器件组成, 所以接收机输出不仅包含了期望信号, 也包含非期望信号。设 $x_n(t)$ 为第 n 个接收机的接收信号; $y_n(t) = f_n(x(t)) = f_L(x(t)) + f_N(x(t)) + u_n(t)$ 为第 n 个

接收机的输出信号,由 $f_L(t)$ 期望输出、 $u_n(t)$ 接收机噪声、 $f_N(t)$ 非期望失真合成。接收机的输出通常被模型化为功率级数^[8-10]:

$$y_n(t) = f_n(x(t)) = \sum b_k x(t)^k = b_0 + b_1 x(t) + b_2 x(t)^2 + \dots \quad (1)$$

式中 b_0 为直流分量; b_1 为期望的线性分量; b_2 及其余部分为导致非期望失真的分量。

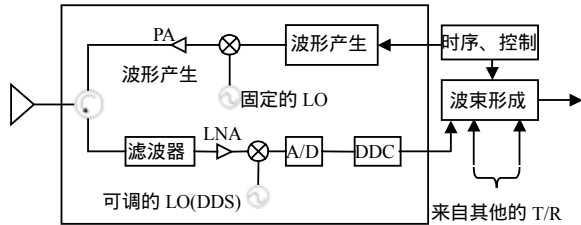


图1 数字阵雷达T/R模块框图

2 数字阵非线性失真去相关化

本文将去相关技术运用于数字阵,用两级相移来减小两类非线性相关:谐波失真及互调失真。

2.1 阵列去相关

阵列非线性去相关接收机框图如图2所示,该方法利用了二级相移。各个通道的接收信号被放大后,用预先确定的值 ϕ_N 进行相移(而传统的接收机都是尽量使各接收通道尽可能地一致),经过接收机下变频及数字化之后,再运用和前面相同的相移值 ϕ_N 进行移相,但是与第一级相移方向相反,然后将输出的信号做DBF。

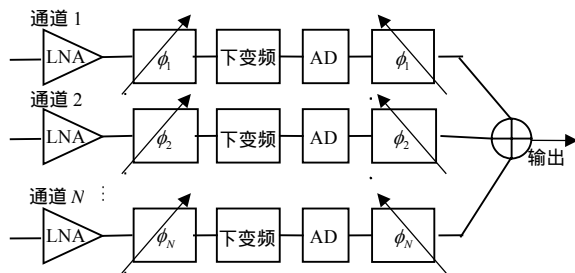


图2 可以减小阵列非线性相关的接收机结构

为了便于分析,设接收机的输入信号为:

$$v_m(t) = a(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \theta_0 + \theta_m + \phi_m] = \frac{1}{2} [u(t) e^{j(\omega_0 t + \gamma_m + \alpha_m)} + u^*(t) e^{-j(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)}] \quad (2)$$

式中 $a(t)$ 为实幅度; $\varphi(t)$ 为相位调制; $\omega_0 = 2\pi f_0$; f_0 为载波频率; θ_0 为接收信号的未知相移,对所有的阵列 θ_0 是相同的; θ_m 为 m 阵元对于参考阵元由于波程差产生的附加相移; ϕ_m 为第 m 阵元的相移,其目的是为了减小阵列的非线性相关; $u^*(t)$ 为复共

轭; $u(t) = I(t) + jQ(t)$; $I(t) = a(t) \cos(\varphi(t))$; $Q(t) = a(t) \sin(\varphi(t))$; $\gamma_m = \theta_0 + \theta_m$ 。通过相移后,信号被下变频到基带,然后再相移 ϕ_m ,方向与第一级相反,然后将各通道的输出做波束形成。

2.2 数学分析

将(2)式代入式(1),可得:

$$y_m(t) = 2 \sum_{m=1}^{\infty} [u^m(t) e^{jm(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)} + u^{*m}(t) e^{-jm(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)}] \times \sum_{i=0}^{\infty} b_{m+2i} \left(\frac{1}{2}\right)^{m+2i} \binom{m+2i}{i} |u(t)|^{2i} + \sum_{i=0}^{\infty} b_{2i} \left(\frac{1}{2}\right)^{2i} \binom{2i}{i} |u(t)|^{2i} \quad (3)$$

假设只取前面四部分,可得:

$$y_m(t) = b_0 + \frac{b_2}{2} |u(t)|^2 + \frac{1}{2} \left[b_1 + \frac{3b_3}{4} |u(t)|^2 \right] \times [u(t) e^{j(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)} + u^*(t) e^{-j(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)}] + \frac{b_2}{4} [u(t)^2 e^{j2(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)} + u^{*2}(t) e^{-j2(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)}] + \frac{b_3}{8} [u(t)^3 e^{j3(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)} + u^{*3}(t) e^{-j3(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m)}] \quad (4)$$

从式(4)可以看出,对于 m 次谐波,在输入端相移 ϕ_m ,接收机输出端的相移变为 $m\phi_m$ 。 $m=1$ 表示了功率级数产生的互调失真,第一部分为直流分量。对接收机输出,即式(4)做反方向的相移,可得:

$$y_m'(t) = \left[b_0 + \frac{b_2}{2} |u(t)|^2 \right] e^{-j\phi_m} + \frac{1}{2} \left[b_1 + \frac{3b_3}{4} |u(t)|^2 \right] [u(t) e^{j(\omega_0 t + \gamma_m)} + u^*(t) e^{-j(\omega_0 t + \gamma_m)}] + \frac{b_2}{4} [u(t)^2 \times e^{j2(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m/2)} + u^{*2}(t) e^{-j2(\omega_0 t + \gamma_m + \phi_m/2)}] + \frac{b_3}{8} [u(t)^3 \times e^{j3(\omega_0 t + \gamma_m + 2\phi_m/3)} + u^{*3}(t) e^{-j3(\omega_0 t + \gamma_m + 2\phi_m/3)}] \quad (5)$$

从式(5)可以看出,期望信号相移后被恢复,但是包含了3阶(及高阶)互调失真;谐波失真信号的相位为 $(m-1)\phi_m$ 。若为每个通道选择不同的 ϕ_m ,则波束形成时谐波失真就不能得到阵列增益。

3 仿真分析

本文通过仿真试验验证理论分析的正确性。数字阵接收机仿真结构如图2所示,假设有10个阵元组成的线阵,RF信号被下变频,数字化。式(1)中的非线性参数设为 $b_1=1$ 、 $b_2=b_3=-0.001$ 。对于谐波和互调失真,本文验证通过二级相移来减小非线性相关是可行的。

3.1 谐波非线性失真仿真

假设输入信号频率为 2 MHz, 谐波非线性失真经过两级相移后, 输出信号的相位为 $(m-1)\phi_m$ 。谐波非线性失真仿真结果如图 3 所示, 该图比较了利用去相关技术后非线性失真的减小程度。从图 3b 可以看出, 如果通道间的非线性是相关的, 则波束形成对非线性失真也会产生处理增益, 约为 $10\lg N = 10\text{ dB}$ (N 为阵元数), 阵列的 IDR 相对于单通道的改善非常有限。而图 3c 表明利用了通道相移技术后, 将通道间的非线性去相关, 波束形成对非线性不产生处理增益, 阵列的 IDR 得到了理想的提高, 约为 $10\lg N = 10\text{ dB}$ 。

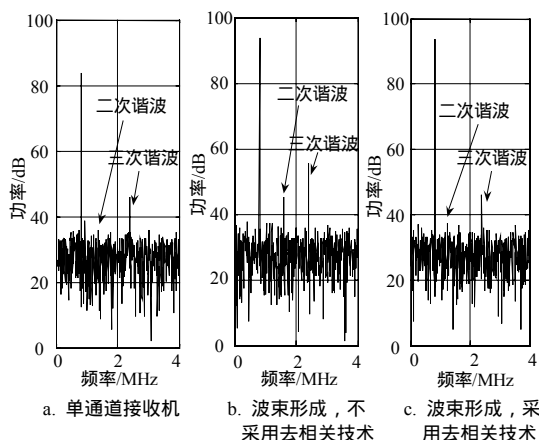


图 3 期望信号及非线性失真比较

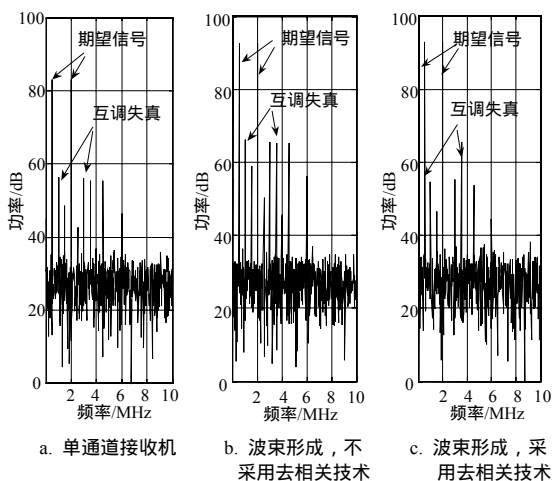


图 4 期望信号及互调失真比较

3.2 二阶和三阶互调失真仿真

二阶和三阶互调失真仿真结果如图 4 所示。假设输入信号频率为 $f_1 = 0.5\text{ MHz}$, $f_2 = 2\text{ MHz}$, 该图比较了利用去相关技术后非线性失真的减小程度。从图 4b 可以看出, 如果通道间的非线性是相关的,

则波束形成对二阶和三阶互调失真也会产生处理增益, 约为 $10\lg N = 10\text{ dB}$, 阵列的 IDR 相对于单通道的改善非常有限。而图 4c 表明利用了通道相移技术后, 将通道间的非线性去相关, 波束形成对二阶和三阶互调失真不产生处理增益。阵列的 IDR 得到了理想的提高, 约为 $10\lg N = 10\text{ dB}$ 。

4 结束语

数字阵的非线性器件在接收机输出端产生非线性失真, 对于单个接收机系统, 传统方法就能阻止非期望信号, 提高系统性能。但是对于大的数字阵, 各接收通道间的非线性往往是相关的, 可以通过 DBF 产生阵列增益, 改善限制系统的动态范围。通过本文描述的方法, 利用接收机二级相移的去相关技术可以有效地减小阵列的某些非线性相关, 大大提高数字阵的 IDR。数学推导及仿真分析显示, 该方法是十分有效的, 可以提高 IDR 达到 $10\lg N$; 而且实现方法简单, 能方便地在工程中的应用。

参 考 文 献

- [1] 邱文杰. DBF 系统的通道校准技术[J]. 电子科技大学学报, 1992, 21(06): 593-600.
- [2] KATZ A. Linearization: reducing distortion in power amplifiers[J]. IEEE Microwave, 2001, 2(4): 37-49.
- [3] FALCONER D D. Adaptive equalization of channel-nonlinear ties in QAM data transmission systems[J]. Bell Syst Tech J, 1978, 57(7): 2589-2611.
- [4] RAZ G M. Highly linear analog to digital conversion system and method thereof[P]. U.S. Patent 6639537, 2001-3-30.
- [5] GERARD C. Procédé et dispositif de rejection des harmoniques émis par une antenne active à balayage électronique[P]. EP0545742, 2000.
- [6] CANTRELL B. ADC spurious signal mitigation in radar by modifying the LO[C]//Radars Conference Proceedings of the IEEE. Piscataway, N.J: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2004:151-153.
- [7] HOWARD L C, SIMON N K, RABIDEAU D J. Mitigation of correlated nonlinearities in digital phased arrays using channel-dependent phase shifts[J]. IEEE MTT-S Digest, 2003, 3: 1525-1528.
- [8] 王吉滨, 孟宪德, 袁业术. 接收机非线性分析及测试[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(2): 165-167.
- [9] 陈 军. 接收机三阶互调失真影响的分析[J]. 现代雷达, 1998, 20(5): 89-90.
- [10] 魏敬义, 雷达接收机中的非线性失真[J]. 现代雷达, 1998, 20(1): 94-104.

编辑 黄 莘