

直接变频技术在雷达中的应用研究

吴远斌*

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 集成化已成为现代电子系统最重要的发展方向, 雷达系统也是如此。现代直接变频技术具有成本极低、体积小、结构简单和高度集成化的特点, 已广泛应用于通信市场, 如手机、基站、卫星接收机和GPS接收机等, 但至今未有在雷达中实际应用的报道。该文对直接变频技术在雷达中的应用进行了研究, 特别是应用到相控阵体制的雷达上, 能极大地降低雷达成本和体积, 且有工作频带极宽、配置灵活、可重构的特点。因此, 直接变频技术也将成为雷达技术的一个发展方向。该文最后给出了一个将直接变频技术应用到S波段相控阵雷达的设计实例。

关键词: 相控阵雷达; 直接变频; 零中频接收机; 全数字式接收机; ADRV9009

中图分类号: TN952

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1170-07

DOI: 10.11999/JEIT191061

Research on Direct-conversion Technology for Radar Application

WU Yuanbin

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Integration has become the most important development direction of modern electronic system, and so is radar system. Modern direct-conversion technology has the characteristics of low cost, small size, simple structure and high integration. It has been widely used in the communication market, such as mobile phones, base stations, satellite receivers and GPS receivers, etc. But up to now, there has been no report of practical application to radar. This paper studies the application of direct-conversion technology to radar, especially to phased array radar, which can greatly reduce the cost and volume of radar, and has the characteristics of wide working frequency band, flexible configuration and reconfiguration. Therefore, direct-conversion technology will also become a development direction of radar technology. Finally, a design example of applying direct-conversion technology to S band phased array radar is given.

Key words: Phased array radar; Direct-conversion technology; Zero-IF receiver; All-digital receiver; ADRV9009

1 引言

直接下变频接收机直接将从天线接收到的射频信号下混到基带, 去除了中频级, 即中频为零, 故也称为“零中频接收机”^[1-10]。它将射频信号与相互正交的两路本振信号分别混频, 进行正交下变换, 形成相互正交的I/Q两路基带信号, 然后在基带进行放大、滤波和A/D变换, 在数字域内利用数字信号处理方法进行数字后处理。它的逆变换就是直接上变频, 可用于激励发射, 结构简单, 可完全集成在一起, 成为单片多路收/发芯片。这里统称为直接变频技术。

直接下变频接收机在几十年前就已经发明, 但由于过去落后的制造工艺带来无法克服的性能缺陷, 致使直接下变频接收机一直未能在工程中实用

化。采用分离器件做成的直接下变频接收机, 正交混频器、I/Q通道是由模拟器件构成的, 工作在基带, 采用直流耦合, 众所周知, 模拟器件工作时电压、电流值是连续时间变化的, 对温度环境变化非常敏感, 同时又是非理想的线性器件, 因而输出直流零漂大、I/Q通道具有幅相失配误差, 且有非线性失真。直流零漂大会严重影响接收机的动态范围, I/Q通道的幅相不一致性误差会产生镜频干扰, 还有偶阶失真, 使接收机的抗干扰能力变差。这些问题严重影响了直接下变频接收机的使用, 致使工程中多以失败而告终。

随着现代集成电路技术的发展和数字信号处理技术的应用, 过去阻碍直接变频技术应用的很多问题现在已经得到解决, 直接变频技术的应用已由不可能变为可能。特别是采用全数字后处理的办法^[11-13], 能够对消直接变频电路的非线性失真和镜频干扰。该方法能在接收机正常工作时不需要任何先验信息

的情况下抵消绝大多数直接下变频接收机的关键失真。加强的对消性能是在考虑强信号输入时引入带内和邻道失真时取得的。这种方法已经通过仿真和实物测试有效。直接下变频体制接收机当今已广泛应用于通信市场，如手机、手机基站、卫星接收机和GPS接收机等，具有成本极低、体积小、结构简单和高度集成化的特点。目前已有家公司推出多种采用直接变频技术的芯片，如AD公司最新推出ADRV9009，还有两年前的AD9371/AD9375系列芯片，性能非常先进，集成度非常高，已可应用于雷达系统。

2 直接下变频技术

直接下变频接收机实际上有两种方式，一种是射频采样，然后在数字域内进行数字下变换和数字滤波，即“全数字式接收机”^[14-16]，其原理如图1所示。全数字化是现代接收机要实现的终极目标，它顺应了接收机中A/D变换器越来越靠近天线端的发展趋势。其射频前端通常需要采用可调谐滤波器或是开关选择的滤波器组，以及超宽带的低噪声放大器，对于工作在几GHz或者几十GHz的微波雷达，用于射频采样的A/D变换器，其采样频率要求超过几十GHz/s，而且需要具有足够的动态范围，这在目前仍无法实现。

另一种直接下变频接收机即为零中频接收机，采用模拟下变频和低通滤波。其原理如图2所示。射频信号与相互正交的两路本振信号分别混频，进行正交下变频，形成相互正交的I/Q两路基带信号，然后在基带进行放大、滤波和A/D变换，在数字域内利用DSP方法进行非线性校正和滤波处理。

比较图1和图2可见，全数字式接收机和零中频接收机的原理框图完全一样，只不过A/D变换器的位置不同，一个是在数字域内进行直接下变换，一

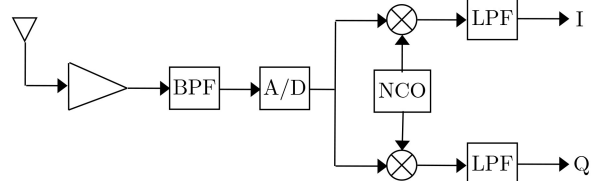


图1 全数字式雷达接收机原理框图

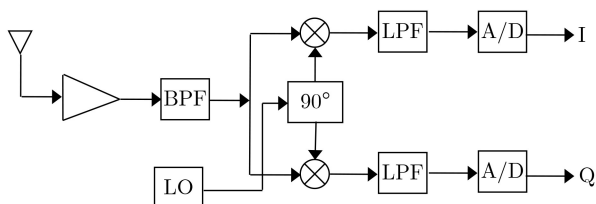


图2 直接下变频接收机原理框图

个是在模拟域内进行直接下变换。它们的性能各有优缺点，其差别主要在于：全数字式接收机没有零漂，也没有低频散弹噪声影响，数字处理的I/Q通道镜频非常小，不用考虑其干扰，但对于有一定工作带宽的雷达系统，接收机的射频前端带宽宽，动态范围小，干扰多。零中频接收机则正好相反，有零漂，有低频散弹噪声影响，模拟I/Q通道存在幅相不一致性误差，但频率选择性好。本文讨论的直接下变频技术专指零中频接收机。

直接下变频接收机相对于超外差式接收机，由于去除了中频级，所以它具有以下优点：

直接下变频省去了抑制镜频的前置滤波器，同时省去中频级和中频滤波器，使部件数量大为减少，减少的都是大体积的、价格昂贵的和无法集成的部件。去掉这些部件，接收机就可以大规模集成。在通道中设置前置滤波器的主要目的是抑制大功率的发射信号，防止通道堵塞。

直接下变频的集成化程度可大幅提高，I/Q支路解调输出的低通滤波器可以用模拟集成电路实现；整个直接下变频、I/Q模拟处理，A/D变换器均可集成在一起，成为单片接收机。

对信号的放大主要发生在基带，这进一步降低了能耗。

直接下变频接收机的输出是I/Q两路基带信号，频谱在低频端，经滤波、放大后可以用较低的采样频率进行A/D采样。

直接下变频接收机存在的许多性能问题，现在已可以通过集成电路工艺和全数字后处理的办法解决。例如，采用全带宽自适应数字对消办法进行处理，这是一种全数字的线性化，不需要任何附加的硬件设备，它能够自适应对消直接下变频接收机的大部分非线性失真和镜频干扰。该方法能在接收机正常工作时不需要任何先验信息的情况下抵消绝大多数直接下变频接收机的关键失真。很强的对消性能是在考虑强信号输入时引入带内和邻道失真时取得的。对于直流偏移，可采用直流反馈校正电路去零漂；I/Q两路幅相一致性误差和相位正交性误差也可采用专门的校正电路进行修正，这些校正电路现均已集成在直接下变频接收机芯片内。

直接下变频接收机芯片由高线性度双平衡I/Q混频器、本振正交发生器和由混频器输出端驱动的I/Q基带缓冲放大器等组成，信号耦合均为差分形式。先进的集成电路技术可使双平衡混频器具有较高的输入2阶和3阶互调截点，输出端的线性度比较平直，可以降低接收机对高电平调幅干扰的灵敏度，即使有强干扰存在，产生的交叉调制也在允许

的范围内，混频器的射频信号和本振信号均采用差分输入，可以对在接收机前端产生的2阶非线性失真具有较高的共模抑制。散弹噪声是低频段大，10 kHz以后就小了，所以在使用时低频段要抑制，I和Q支路的视频放大部分增益不能太高，采用先进的集成电路工艺能显著降低散弹噪声。本振信号对天线和接收机前端的电磁辐射，引起的干扰是产生直流偏移的一个原因，称为自混频。通常采用本振输入是本振频率本身(等于信号频率)的2倍，降低自混频的影响。在设计布局和屏蔽上采取严密措施，防止本振信号直接泄漏到接收机的输入端。

通过采取上述措施，很好地解决了直接下变频体制所存在的问题：通过零点自适应校正使得零点漂移大幅下降，低至≤-75 dBFS，通过全带宽自适应数字对消办法使得I/Q镜频抑制度≥75 dB，非线性IIP2≥65 dBm，偶阶失真很小，本振泄漏也非常小。

3 直接下变频在雷达中的应用研究

采用直接下变频接收机技术，常用的雷达处理流程如图3所示^[17]。

脉冲调制的线性调频是一个常用的雷达信号波形，设射频回波信号为 $S(t) = A(t) \cos[2\pi f_{RF}t + \phi(t)]$ ，射频信号与相互正交的两路本振信号分别混频，本振信号频率等于发射信号的载波频率，这样直接下变频到基带，形成相互正交的I/Q两路基带信号，用复数形式表示为

$$X_p(t) = X_i(t) + d_i + j[X_q(t) + d_q] = X(t) + X_{mr}(t) + d_{iq}$$

其中， $X(t)$ 是我们需要的目标信号， $X_{mr}(t)$ 是由于I/Q通道的幅相不一致性误差产生的镜频干扰， d_{iq} 表示直流零漂。设 f_d 为多普勒频移。经过FFT，在频域可表示为

$$\frac{A(t)}{2} e^{j[\phi(t)+2\pi f_d t]} + \frac{A(t)}{2} e^{-j[\phi(t)+2\pi f_d t]} + d_{iq}$$

在频谱上可观察到返回信号多普勒频率、镜频、

直流零漂，还能看到2阶、3阶非线性失真分量。对于线性调频信号

$$X(t) = A(t) \cos\left(2\pi f_d t + \frac{ut^2}{2}\right), -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}$$

然后通过匹配滤波器，其传输函数等于信号频谱的复共轭，匹配滤波器的脉冲响应为 $h(t) = kX(-t)$ ，即

$$h(t) = k \cos\left(2\pi f_d t - \frac{ut^2}{2}\right), -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}$$

匹配滤波器的输出信号为

$$g(t) = k \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t-\tau)d\tau$$

这个匹配滤波既可在时域计算，也可在频域计算。设线性调频信号的带宽为 B ，脉宽为 T ，经过上述匹配滤波后线性调频信号就压缩为窄脉冲，窄脉冲上有多普勒频移调制，压缩比为 BT 。因此，经过脉冲压缩后回波信号会产生脉压得益 $10\lg(BT)$ 。再通过FFT等运算，就得到目标信号的多普勒距离信息。显然，由于I/Q通道的幅相不一致性误差产生的镜频 $X_{mr}(t)$ 与匹配滤波器的传输函数并不匹配，因此，匹配滤波后，镜频抑制比会增加 $10\lg(BT)$ 。设接收机的镜频抑制比为 IRR ，则最后信号处理输出的距离多普勒图上镜频抑制比为 $IRR+10\lg(BT)$ 。

最近几年，低成本直接下变频接收机技术已普遍应用于通信领域，如手机、手机基站、卫星接收机和GPS接收机等，具有成本极低、体积小、结构简单和高度集成化的特点。直接下变频接收机的性能得到极大提升。现已有成熟的货架商品出售，如AD公司的ADRV9009。我们采用ADRV9009制作了一个工作于S波段的雷达试验系统。将ADRV9009加上低噪放、滤波器和功放后，就能构成一个具有双发双收通道的数字式T/R组件，因为其对外接口均为数字量，故称为数字式T/R组件，其硬件组成如图4所示。

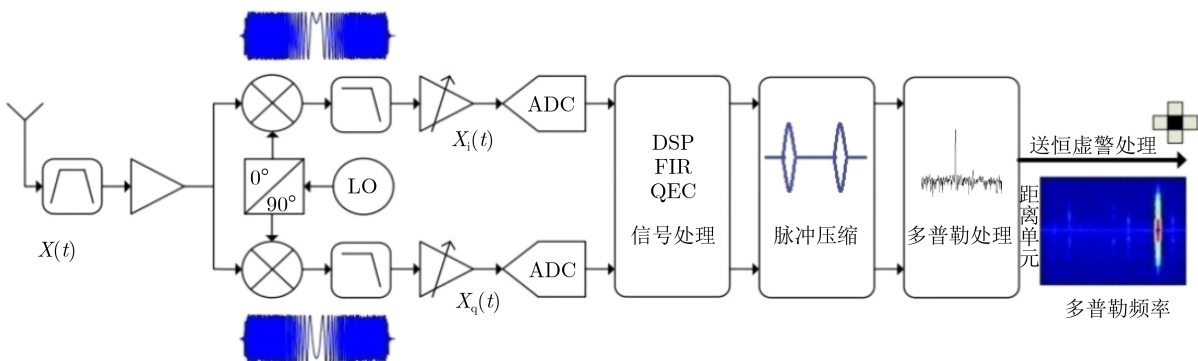


图3 常用的雷达处理流程图

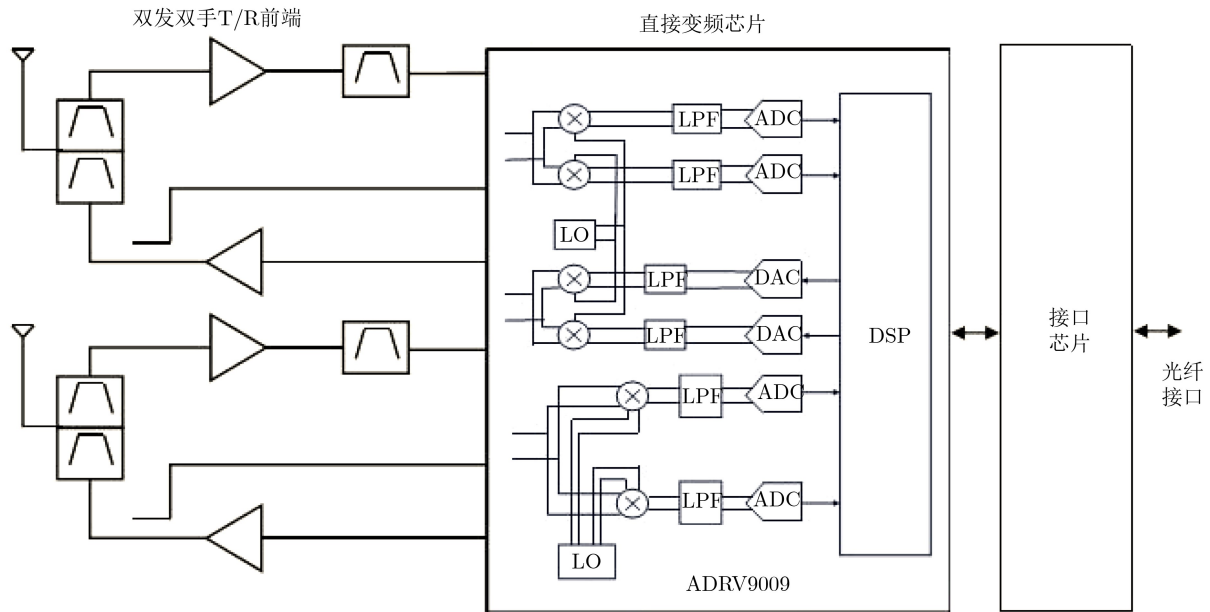


图4 直接变频雷达框图

由图4可见，采用零中频技术的双发双收通道的数字式T/R仅需少数几个外围器件，可布置在一个很小的空间内，且带有各自独立的频综系统，可实现分布式频率源和频率分集。

4 采用直接下变频技术的雷达系统性能

ADRV9009工作频率：75 MHz~6 GHz，单芯片内具有双发双收通道，再外加2个观察通道，片内已集成IQ解调/调制、A/D和D/A等功能，对外采用数字高速接口，每个收/发/观察通道均具有自适应的直流零漂校正、正交误差校正、非线性校正和可变带宽滤波功能，接收带宽最大200 MHz；发射带宽最大450 MHz。接收通道噪声系数 $NF \leq 12$ dB；I/Q镜频抑制度 $IRR \geq 75$ dB； $IIP3 \geq 12$ dBm； $IIP2 \geq 62$ dBm；零点漂移 ≤ -75 dBFS；I/Q输出数据位数16位；增益控制范围0~30 dB，步进0.5 dB，其原理框图如图5所示。

我们采用以下参数进行试验：线性调频信号的带宽为 $B=10$ MHz，脉宽为 $T=20\mu s$ ， $f_d=1$ kHz，采集了200个脉冲进行处理，最后测得的距离多普勒图如图6所示。在频谱上可观察到信号镜频、直流零漂，还能看到2阶、3阶非线性失真分量对雷达性能的影响。在 $-f_d$ 处产生了1个虚假目标，但幅度很小，低于真实目标 $IRR+10\lg(BT)=75+23=98$ dB，2阶、3阶非线性失真分量也低于真实目标90 dB，由于直流零漂所限制的SFDR达到了75 dB以上。真实的雷达接收机有内部噪声，A/D变换器的动态范围也不高，能做到的整机SFDR也就在75 dB左右，因而由直接下变频技术带来的性能因素对雷达的目标检测影响非常小。

采用直接下变频技术的雷达T/R组件与传统的射频T/R组件相比，具有以下优点：成本低，体积小；降低了对复杂馈线系统的要求；在数字域内实时延时，可采用DBF技术；易于实现接收本振和发射信号波形匹配；在一个重复周期内易于实现多个复杂波形；便于实现频率分集。

现代相控阵雷达越来越多地采用DBF体制，因而采用的接收机路数越来越多，有的甚至已达近万个通道，这时必须对接收机的体积、成本、可靠性进行综合考虑。接收机采用超外差式的结构已经有超过70年的历史，在1990年以前它还是唯一最好的方法，直接下变频接收机的应用仅仅只有理论上的可行性。随着现代集成电路技术的发展，过去阻碍直接下变频接收机应用的很多问题现在已经得到解决，直接下变频接收机的应用也已由不可能变为可能。直接下变频技术也必将成为雷达技术的一个发展方向。

采用ADRV9009做雷达数字式T/R组件，接收机的噪声系数、增益、动态范围、带宽等技术指标均可达到常规雷达接收机指标，而体积、成本远小于常规雷达接收机。而以往直接下变频接收机所存在的问题已不再限制雷达性能，如零点漂移和I/Q镜频均在75 dB以下，已能满足雷达的动态性能要求。

对于相控阵应用，假如整个天线阵面有 N 个单元，每个天线单元均连接数字T/R，每个天线单元接收到的信号功率与同样增益的单天线、单路接收机系统相比，其接收到的信号功率只有后者的 $1/N$ ，因而每个天线单元通道中的接收机动态范围

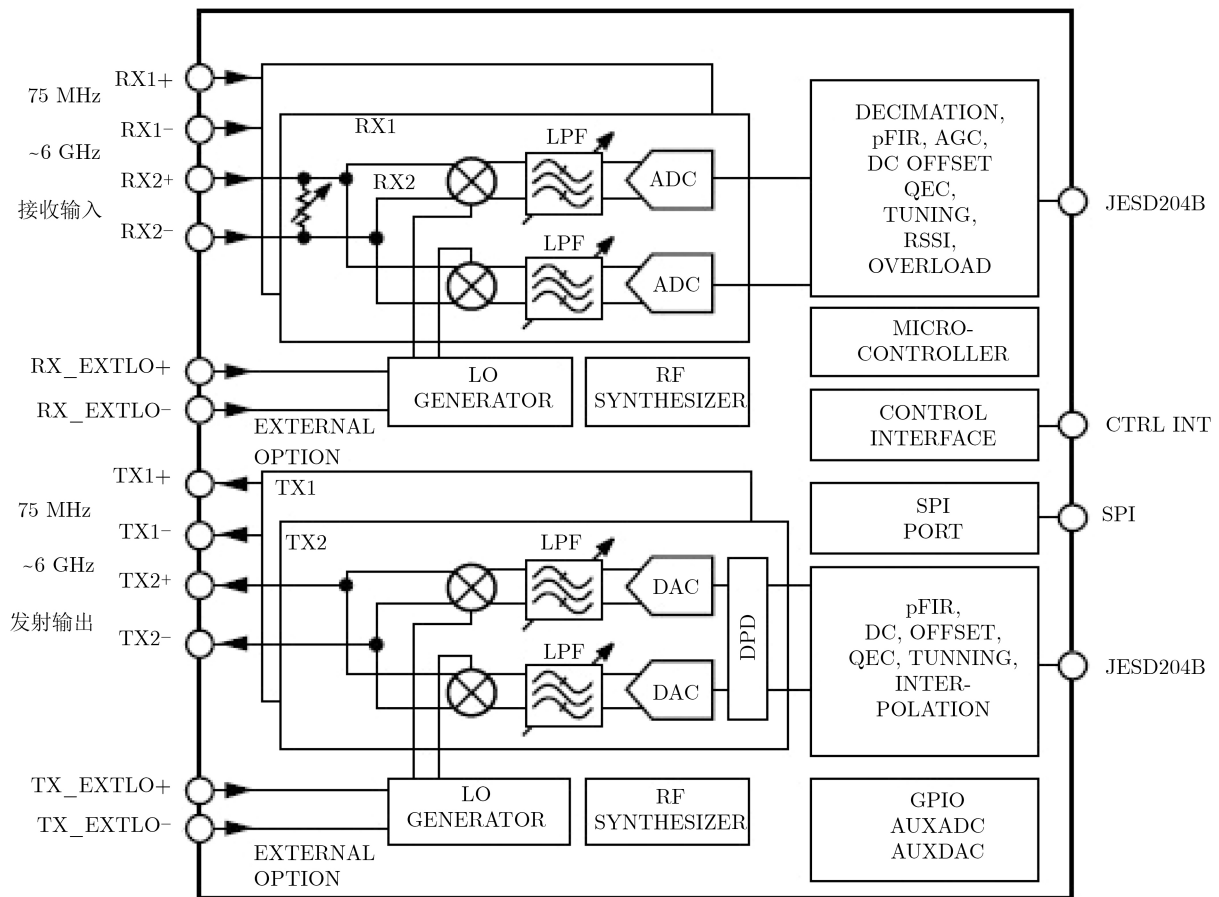


图5 采用直接变频技术的多路收/发芯片

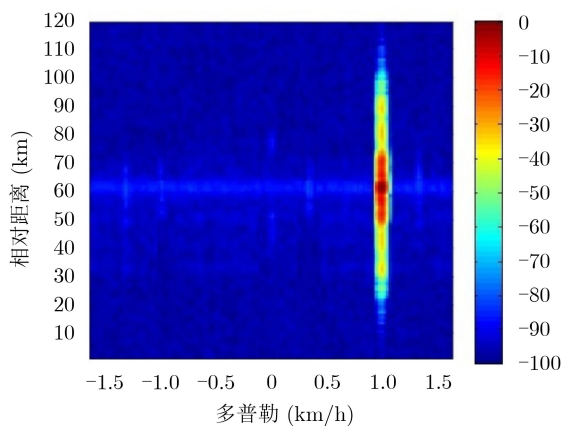


图6 距离多普勒图

要求可降低 $10\lg N$ (dB)。此外，目前绝大多数相控阵雷达均采用脉冲压缩信号，且采用数字脉冲压缩，在接收模拟通道中，接收回波信号尚未进行压缩，回波信号还低于噪声电平，因此，对脉冲压缩比为BT的信号，对单元通道接收机动态范围的要求又可降低 $10\lg BT$ (dB)。例如，若对接收机总的动态范围要求为100 dB，则当天线单元数 $N=1000$ ，脉冲压缩比为1000时，对单元通道接收机动态范围的要求可降低为40 dB。接收机还能通过STC、杂

波图等措施进一步压缩动态范围要求。在雷达阵列信号处理中，单个组件的零点漂移和I/Q镜频均在75 dB以下，波束合成后也不会影响雷达的信号检测。

直接下变频接收机最重要的优点就是可以全集成化，省去了传统雷达接收机中的多级频率变换电路，其混频、放大、滤波、正交相移、可变本振源、I/Q两路的ADC及发射通道均可集成在一个芯片内，而且其工作频率可以跨越多个波段，形成宽带接收机。

5 结束语

本文对直接变频技术在雷达中的应用进行了研究，并用一个真实的直接变频雷达进行了试验验证，最后测试的雷达性能表明，直接变频技术能够应用于雷达系统。直接变频雷达成本低、体积小、可以全集成化，做成单芯片雷达^[18]，并且可以实现探测、干扰、侦察、通信多功能一体化^[19,20]。因此，直接变频技术也将成为雷达技术的一个发展方向。

参考文献

- [1] 王红举. 窄带零中频接收机IQ不平衡校准技术研究[J]. 现代导航, 2018, 9(2): 114-118. doi: 10.3969/j.issn.1674-7976.2018.02.007.

- WANG Hongju. Research on IQ imbalance calibration technology for narrowband zero-IF receiver[J]. *Modern Navigation*, 2018, 9(2): 114–118. doi: [10.3969/j.issn.1674-7976.2018.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7976.2018.02.007).
- [2] 张辰亚, 陈晓楠, 刘家成, 等. 基于FMCW测距雷达系统模块化实验平台设计[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(5): 106–110. doi: [10.16791/j.cnki.sjg.2018.05.028](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2018.05.028).
- ZHANG Chenya, CHEN Xiaonan, LIU Jiacheng, *et al.* Design on modular experimental platform based on FMCW ranging radar system[J]. *Experimental Technology and Management*, 2018, 35(5): 106–110. doi: [10.16791/j.cnki.sjg.2018.05.028](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2018.05.028).
- [3] 区洋, 刘重军, 邓单. 一种零中频数字接收机镜像抑制新算法[J]. *移动通信*, 2018, 42(6): 80–85. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2018.06.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2018.06.015).
- OU Yang, LIU Zhongjun, and DENG Dan. A new image rejection algorithm for zero-IF digital receiver[J]. *Mobile Communications*, 2018, 42(6): 80–85. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2018.06.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2018.06.015).
- [4] 龚艾琦, 蔺雪洁. L波段射频直接采样数字接收机设计技术[J]. *数字化用户*, 2017(13): 11. doi: [10.3969/j.issn.1009-0843.2017.13.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0843.2017.13.011).
- GONG Aiqi and LIN Xuejie. Design technology of L-band RF direct sampling digital receiver[J]. *Shuzihua Yonghu*, 2017(13): 11. doi: [10.3969/j.issn.1009-0843.2017.13.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0843.2017.13.011).
- [5] 杨冬奎, 王延夺, 张鹏飞. 基于ARM的射电脉冲星数字接收机系统控制软件设计与实现[J]. *工业控制计算机*, 2017, 30(8): 148–149, 153. doi: [10.3969/j.issn.1001-182X.2017.08.066](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-182X.2017.08.066).
- YANG Dongkui, WANG Yanduo, and ZHANG Pengfei. Control software of digital receiver system for radio pulsar based on ARM[J]. *Industrial Control Computer*, 2017, 30(8): 148–149, 153. doi: [10.3969/j.issn.1001-182X.2017.08.066](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-182X.2017.08.066).
- [6] 张驰, 芮国胜, 王瑞, 等. 基于FPGA的甚低频宽带接收机设计[J]. *计算机与数字工程*, 2017, 45(9): 1866–1869, 1887. doi: [10.3969/j.issn.1672-9722.2017.09.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9722.2017.09.037).
- ZHANG Chi, RUI Guosheng, WANG Rui, *et al.* Design of VLF wideband receiver based on FPGA[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2017, 45(9): 1866–1869, 1887. doi: [10.3969/j.issn.1672-9722.2017.09.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9722.2017.09.037).
- [7] 张秋艳, 王超, 陈严君. 具有射频监测能力的雷达接收前端技术[J]. *信息技术与网络安全*, 2018, 37(8): 58–61. doi: [10.19358/j.issn.2096-5133.2018.08.014](https://doi.org/10.19358/j.issn.2096-5133.2018.08.014).
- ZHANG Qiuyan, WANG Chao, and CHEN Yanjun. Radar receiving front-end technology with frequency monitoring capability[J]. *Information Technology and Network Security*, 2018, 37(8): 58–61. doi: [10.19358/j.issn.2096-5133.2018.08.014](https://doi.org/10.19358/j.issn.2096-5133.2018.08.014).
- [8] 竺磊, 吴俊杰, 万川川, 等. 一种宽带接收机射频前端芯片设计[J]. *微处理机*, 2018, 39(3): 15–19. doi: [10.3969/j.issn.1002-2279.2018.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2279.2018.03.004).
- ZHU Lei, WU Junjie, WAN Chuanchuan, *et al.* Design of RF front-end chip for wideband receiver[J]. *Microprocessors*, 2018, 39(3): 15–19. doi: [10.3969/j.issn.1002-2279.2018.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2279.2018.03.004).
- [9] 周曼琳. 直接下变换接收机的实现[J]. *无线电技术*, 2005(33): 53–59.
- ZHOU Manlin. Direct downconversion receiver implementation[J]. *Radio Technology*, 2005(33): 53–59.
- [10] 徐建, 孙大有. 无线接收机RF前端研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2000, 30(3): 136–141. doi: [10.3321/j.issn:1001-0505.2000.03.030](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-0505.2000.03.030).
- XU Jian and SUN Dayou. Research on RF front-end of wireless receiver[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2000, 30(3): 136–141. doi: [10.3321/j.issn:1001-0505.2000.03.030](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-0505.2000.03.030).
- [11] ANTTILA L, VALKAMA M, and RENFORS M. Circularity-based I/Q imbalance compensation in wideband direct-conversion receivers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2099–2113. doi: [10.1109/TVT.2007.909269](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.909269).
- [12] ALLÉN M, MARTTILA J, VALKAMA M, *et al.* Digital full-band linearization of wideband direct-conversion receiver for radar and communications applications[C]. The 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2015: 1361–1368.
- [13] BASSI M, BEVILACQUA A, GEROSA A, *et al.* Integrated SFCW transceivers for UWB breast cancer imaging: Architectures and circuit constraints[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2012, 59(6): 1228–1241. doi: [10.1109/TCSI.2011.2173400](https://doi.org/10.1109/TCSI.2011.2173400).
- [14] 吴远斌, 包象阳, 袁朔. 全数字式阵列接收机在OTH雷达中的应用[J]. *现代雷达*, 2007, 29(2): 73–75. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2007.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2007.02.021).
- WU Yuanbin, BAO Xiangyang, and YUAN Shuo. Application of full digital array receiver in OTH radar[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(2): 73–75. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2007.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2007.02.021).
- [15] WU Yuanbin and LI Jinwen. The design of digital radar receivers[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1998, 13(1): 35–41. doi: [10.1109/62.653823](https://doi.org/10.1109/62.653823).
- [16] 吴远斌, 李景文. 直接中频采样及数字相干检波的研究[J]. *电子学报*, 1994, 22(10): 105–107. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1994.10.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1994.10.020).
- WU Yuanbin and LI Jingwen. Research on IF signal sampling directly and digital coherent detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1994, 22(10): 105–107. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1994.10.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1994.10.020).
- [17] SCHEER J A and KURTZ J L. Coherent Radar

- Performance Estimation[M]. Norwood: Artech House, 1993.
- [18] SARMAH N, GRZYB J, STATNIKOV K, *et al.* A fully integrated 240-GHz direct-conversion quadrature transmitter and receiver chipset in SiGe technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(2): 562–574. doi: [10.1109/TMTT.2015.2504930](https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2504930).
- [19] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- XIAO Bo, HUO Kai, and LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- [20] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于OFDM-LFM信号的MIMO雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 801–808. doi: [10.11999/JEIT180547](https://doi.org/10.11999/JEIT180547).
- LIU Bingfan and CHEN Baixiao. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 801–808. doi: [10.11999/JEIT180547](https://doi.org/10.11999/JEIT180547).

吴远斌: 男, 1967年生, 教授级高级工程师, 研究方向为先进雷达阵面系统技术、全数字式接收机、高速A/D变换系统、高速实时DSP等.

责任编辑: 陈倩