

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.021

基于数字变带宽的雷达数字中频信道化设计^{*}

杨胜华^{**},梁志霄,雷 云

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:在雷达中频数字信道化中为了简化实现多种带宽的设计要求,提出了数字变带宽设计方法改变接收信道的带宽。首先,与传统的模拟变带宽的设计方法比较分析表明,该方法具有降低多带宽接收信道设计复杂程度的优点;然后,通过建立理论模型,对其进行仿真和分析,理论原理可行。最后通过实测某雷达回波信号进行验证,仿真结果和实测结果基本一致。结果表明,该方法不影响接收信道输出信噪比,同时又能简单实现接收信道的多种带宽改变,具有可行性和工程实用性。

关键词:雷达接收机;中频数字信道化;数字变带宽

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1079-05

Radar Digital IF Channelized Design Based on Digital Bandwidth Adjustment

YANG Sheng-hua, LIANG Zhi-xiao, LEI Yun

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract:To simplify radar IF digital receiver design which needs various bandwidth, a digital-bandwidth adjustment method is proposed to change the receiver's bandwidth. Firstly, this method and conventional analog-bandwidth adjustment are compared and analyzed to show the advantage in reducing variable bandwidth receiver design complexity. Then this method is proved to be feasible by modeling and simulating. Finally, it is validated by measuring a radar return signal on the spot, and the experimental data is basically in accordance with that of simulation. The results shows that the method doesn't affect receiver output SNR (Signal-to-Noise Ratio) and can simply complishes many bandwidth adjustments in digital domain, so it possesses feasibility and engineering applicability in real radar channel design.

Key words: radar receiver; digital IF channelized; digital bandwidth adjustment

1 引 言

随着现代战争需要和雷达技术日新月异的发展,对雷达目标特性要求已经不只局限于雷达技术最初阶段对目标的定位(即对目标的距离和角度信息的获取),还需要目标进行分类和识别;同时受平台体积、载荷要求的限制,需要减少平台上的设备量,要求雷达同时具备多种功能的能力,即敌我识

别、通信和导航、电子对抗、气象监测、地形跟随与防撞预警、辅助着陆等功能,以此减少平台上的设备量。雷达多功能要求对波形和接收信道带宽设计提出了更高要求,雷达接收机需设计成多种带宽才能达到满足多功能的要求。传统的信道化模拟变带宽设计方式在简化信道设计、降低成本、提高设备可靠性方面不能较好地满足设备要求。

随着高速 ADC 模数转换技术和高速超大规模集成电路的高速发展,ADC 采样向射频推进,雷达

^{*} 收稿日期:2013-01-04;修回日期:2013-06-26 Received date:2013-01-04;Revised date:2013-06-26

^{**} 通讯作者:shyang2008@tom.com Corresponding author:shyang2008@tom.com

• 1079 •

中频数字信道化技术能简单、方便实现。得益于数字处理技术的快速发展,本文对传统的信道化模拟变带宽技术进行改进,提出在数字域实现信道带宽可改变的技术。通过理论建模、仿真和实测某雷达回波数据验证证明,该方法基本不影响输出信噪比,还可以提高接收机的动态范围,提高接收机正交一致性、幅频特性和相频特性,同时降低接收信道设计复杂性。

2 雷达中频接收数字变带宽设计

接收信道变带宽设计常采用传统的模拟变带宽,本文采用数字信号处理技术^[1-2]和中频数字信道化技术相结合的设计,根据信号的带宽,在数字域上实现接收信道带宽可改变的要求。

2.1 传统中频数字信道化变带宽处理

对于雷达接收机设计,传统模拟变带宽的数字信道化设计方法根据系统功能要求综合考虑设计合理的中频载频和多种接收带宽;然后在中频信号部分选择多种不同形式模拟带宽的带通匹配滤波器,并使用模拟开关进行切换实现带宽选择;最后,只采用一种采样速率的 ADC 完成采样,实现数字下变频、滤波和抽取,把数据传输给信号处理机处理。整个工作原理过程如图 1 所示。

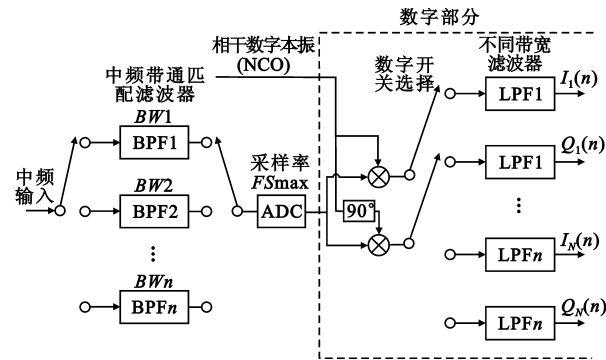


图 1 传统的变带宽设计方法

Fig.1 Conventional bandwidth adjustment method

从传统模拟变带宽的数字信道化设计原理可以看出,其缺点较突出,ADC 采样前具有多个不同模拟带宽的带通滤波器,增大了接收信道的体积、重量和成本,同时提高信道的复杂性,降低了可靠性。

2.2 一种新的中频信道化数字变带宽原理

在数字域实现变带宽设计工作原理如图 2 所示,与传统的模拟变带宽数字信道化设计相比,数字

变带宽信道化设计最大差别为:在选择中频匹配滤波器时,不再增加模拟开关完成带宽选择,只选择雷达要求的最大接收带宽(BW_{max}),然后进行数字下变频、低通滤波和抽取,采用不同带宽的数字滤波器直接在数字域完成多种信号带宽选择,得到不同带宽数字基带复信号。

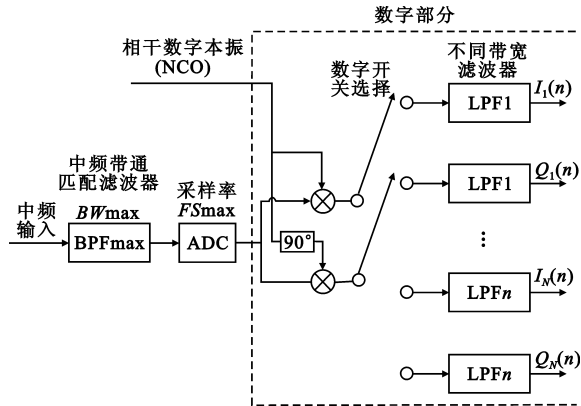


图 2 一种新的在数字域实现变带宽设计方法

Fig.2 The digital bandwidth adjustment method in digital domain

2.3 模拟和数字变带宽接收信道性能比较

图 2 中的方案(简称“方案 2”)与图 1 中的方案(简称“方案 1”)相比较可以看出:

(1)减少了中频匹配滤波器的数量,如果雷达接收系统需要 M 种带宽, N 个通道,方案 2 中中频匹配滤波器的数量为方案 1 的 $1/(M \times N)$;

(2)方案 2 比方案 1 通道间幅相一致性高;

(3)用不同带宽数字滤波器实现频率选择,能较好地实现相位线性特性和幅频特性;

(4)方案 2 比方案 1 使用滤波器少,简化了设计,电路抗干扰性提高,信道尺寸相应减小,重量减轻,成本降低,功耗有所降低,可靠性提高。

3 数字域改变接收信道带宽的仿真与分析

3.1 数字变带宽仿真

对于信号带宽和接收机中频模拟带宽相匹配的情况与方案 1 一样,在此不再做仿真,只仿真信号带宽与接收机中频匹配滤波器带宽不匹配且窄的情况;然后经过数字滤波实现在宽带接收条件下滤掉多余的带外噪声,达到与模拟接收进行匹配滤波相同的效果。

(1)信号、噪声模型及参数

回波信号为信号加噪声,目标脉冲回波信号为调制到中频载频的线性调频信号 $x(t)$,噪声为调制

到中频载频的带限噪声信号 $n(t)$ 。

$$x(t) = A \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{t_p}\right) \cos(2\pi f_1(t-\tau) + \mu\pi(t-\tau)^2) \quad (1)$$

$$s(t) = x(t) + n(t) \quad (2)$$

式中, A 为与目标 RCS(Radar Cross Section)、天线调制、距离和雷达参数相关的参数, $\text{rect}\left(\frac{t-\tau}{t_p}\right)$ 为矩形函数, t_p 为脉冲宽度, τ 为回波延时, μ 为线性调频斜率, f_1 为中频载频。

噪声功率 P_n 采用某雷达信道参数进行设计,

$$P_n = KTB_nN_fG \quad (3)$$

式中, K 为波尔兹曼系数, 为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为天线噪声温度, 这里为 290 K ; B_n 为等效噪声带宽; N_f 为噪声系数; G 为信道增益。参数选择原则: 满足带通采样原理和数字中频信道化理论^[3], 同时信道参数的设计保证了 ADC 对整个接收系统的噪声系数影响很小。中频载频频率为 540 MHz , 接收机的噪声带宽为 108 MHz , 信号带宽为 20 MHz , 接收机噪声系数为 5 dB , 信道增益为 72 dB , ADC 采样率为 240 MHz 。

(2) 仿真算法流程设计

通过预先设计的参数, 产生中频载波的窄带线性调频信号; 再与预先产生的中频宽带带限噪声信号相加, 得到一定信噪比的信号; 然后通过数字下变频、窄带低通滤波、抽取, 最后通过脉冲压缩处理, 将仿真压缩后的结果进行信噪比分析, 并与理论脉压处理信噪比改善因子进行比较。仿真流程图如图 3 所示。

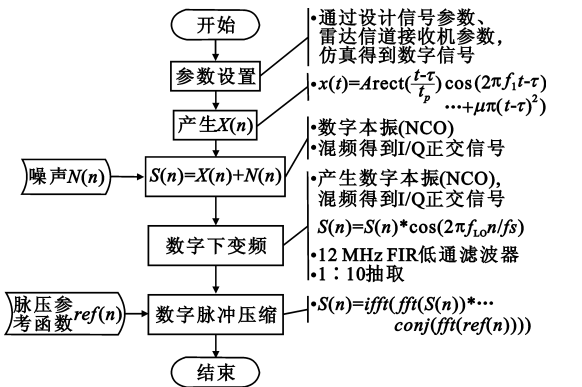


图 3 仿真算法流程图
Fig.3 Flow chart of simulation algorithm

(3) 仿真结果

输入信噪比为 15 dB , ADC 的噪声对接收噪声的影响很小, 可以忽略。信号加噪声的频谱如图 4 所示。

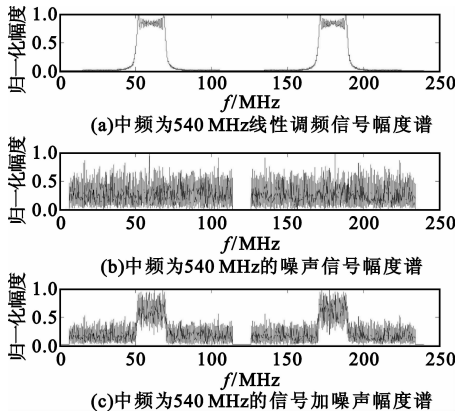


图 4 信号、噪声及信号加噪声幅度谱
Fig. 4 Signal spectrum, noise spectrum, and signal plus noise spectrum

完成数字下变频, 经过 3 dB 带宽为 12 MHz 低通滤波器后按 $10:1$ 进行抽取得到的信号实部、虚部如图 5 所示。

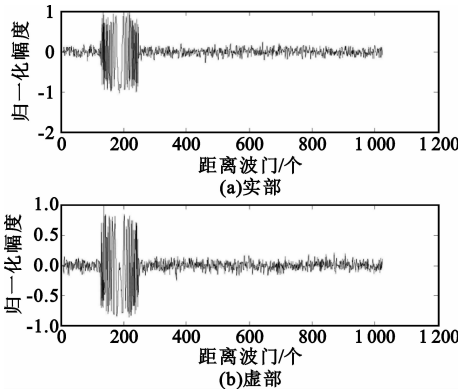


图 5 混频滤波后信号的实部和虚部
Fig.5 Signal's real part and imaginary part after mixing and filtering

复信号幅度谱与数字脉冲压缩后时域信号如图 6 所示。

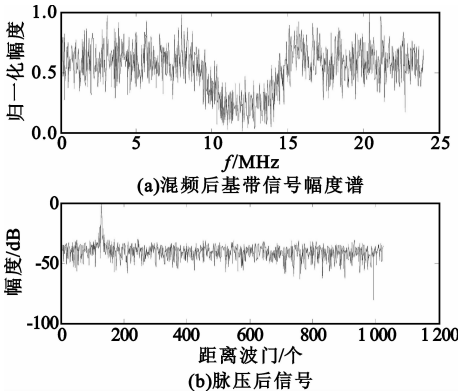


图 6 混频后复信号幅度谱和脉压后信号
Fig.6 Complex signal spectrum after mixing processing and signal of pulse compression

脉冲压缩后输出信噪比为34.7 dB,实际仿真压缩后信噪比改善为19.7 dB,在该参数设置的条件下理论改善因子为20 dB。因此,采用数字变带宽的方法进行脉压后的信噪比基本没有损失,证明该方法可行。

3.2 实测某雷达接收信号进行验证

某双带宽雷达中频为560 MHz,匹配滤波器3 dB带宽为30 MHz和180 MHz。使用力科示波器 SDA-813Zi 采集回波数据,采样率为2 GHz,采样点数为10⁶,FFT 处理后两种带宽下的噪声频谱如图 7 所示。

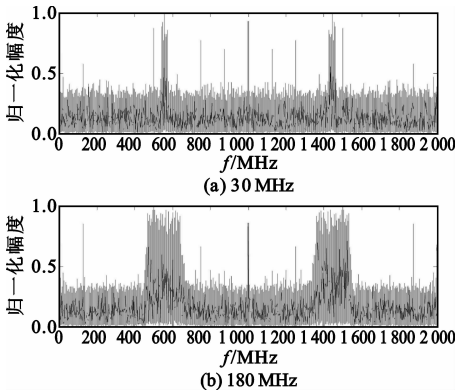


图 7 30 MHz 和 180 MHz 双带宽噪声频谱
Fig.7 30 MHz and 180 MHz noise spectrum

用雷达波形产生器产生25 MHz带宽的信号,分别通过30 MHz和180 MHz模拟匹配滤波器后信号频谱如图 8 所示。

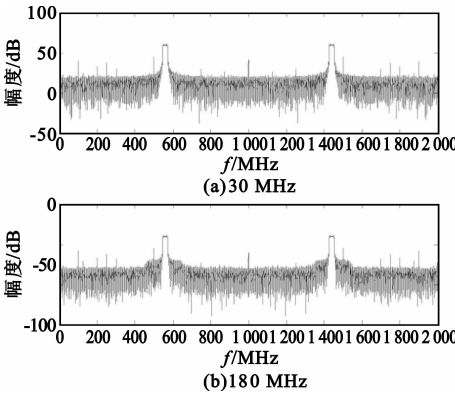


图 8 30 MHz和180 MHz接收带宽下信号频谱
Fig.8 30 MHz and 180 MHz signal spectrum

对两种噪声带宽下的信号进行混频、滤波(滤波器3 dB为13.5 MHz),按 50:1 进行抽取后信号的频谱和两种带宽下进行脉冲处理后的结果如图 9 所示。

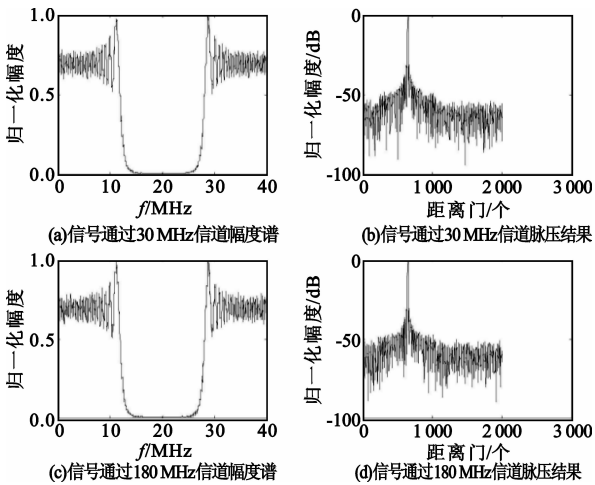


图 9 基带信号频谱和脉压结果
Fig.9 Baseband signal spectrum and result of pulse compression processing

通过对图 7~9 中的实测数据进行分析可知,在实际输入信号带宽为25 MHz,通过30 MHz和180 MHz带宽的模拟滤波器时输入信噪比分别为9.8 dB和1.9 dB,经过 ADC 采样,完成数字下变频,低通滤波处理后,对于在两种脉冲压缩处理结果分别为34.4 dB和34.2 dB,可以得出信号经过数字变带宽滤波后输出信噪比基本没有改变。特别是3 dB带宽为30 MHz的模拟匹配滤波器,采用数字 FIR 滤波器实现,能得到更好的幅频特性,幅频响应归一化均方根误差可以达到 2%;相频响应均方根误差可以控制到 2.5°。因此,采用数字变带宽方法不影响脉冲压缩后输出信噪比,对于宽带滤波器下,窄带信号经过滤波器后,再经过具有线性相位的 FIR 滤波具有更好的幅频特性和相频特性。

4 结束语

本文研究了中频数字信道化数字变带宽技术,对其建立模型并进行了仿真、分析和验证,结论是不影响输出信噪比,对提高接收信道的性能指标、减少模拟信道设备量、降低设备成本、提高可靠性等方面具有重要意义,对雷达系统设计师在设计多频段、多通道接收雷达时提供方案优化具有一定的参考价值。随着信号带宽大幅增加,雷达中频模拟信道的滤波器设计一段受限于相对带宽,同时中频载频加上二分之一带宽的上限频率一般随信号带宽增加而提高,这样对 ADC 模拟输入带宽和采样率提出更高要求。因此,必须根据系统要求和 ADC 技术水平精心对 ADC 进行挑选。

数字滤波器具体实现一般采用 FPGA 芯片,可以独立设计滤波器参数采用“开关”方式选择满足几种带宽需要,在 FPGA 中分别实现;为了节省 FPGA 的逻辑资源,可考虑采用可变带宽 FIR (Finite Impulse Response) 数字滤波器^[4]实现。

参考文献:

- [1] Mahafza B R, Elsherbeni A Z. MATLAB Simulation for Radar Systems Design [M]. New York: Chapman & Hall/CRC Press, 2004.
- [2] 吴顺君. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
WU Shun-jun. Radar Signal Processing and Data Processing Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008. (in Chinese)
- [3] 弋稳. 雷达接收机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
YI Wen. Radar Receiver Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005. (in Chinese)
- [4] 吴伟, 唐斌. 可变带宽线性相位 FIR 滤波器的设计和实现[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 782 - 786.
WU Wei, TANG Bin. Design and Implementation of Linear-Phase FIR Filter with Variable Bandwidth[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(4): 782 - 786. (in Chinese)

作者简介:



杨胜华(1976—),男,四川遂宁人,2000 年于电子科技大学获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为雷达信号处理及雷达总体技术;

YANG Sheng-hua was born in Suining, Sichuan Province, in 1976. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. He is now a senior engineer. His research concerns radar signal processing and radar system design.

Email: shyang2008@tom.com

梁志霄(1970—),男,四川泸州人,1995 年于西安电子科技大学获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为雷达信道技术;

LIANG Zhi-xiao was born in Luzhou, Sichuan Province, in 1976. He received the B. S. degree from Xidian University in 1995. He is now a senior engineer. His research concerns radar channel technology.

Email: liangzhx@sohu.com

雷 云(1969—),男,四川成都人,1990 年于电子科技大学获学士学位,现为高级工程师,主要从事雷达系统研究工作。

LEI Yun was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1969. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1990. He is now a senior engineer. His research concerns radar system.

Email: swiet_ly@sina.com