

文章编号: 2095-4980(2022)06-0583-07

X 波段低相噪宽频带雷达频率综合器设计

王玉江, 张 博, 赵达军, 黄俊祥

(四川航天电子设备研究所, 四川 成都 610100)

摘 要: 随着雷达导引头在弹载方面的广泛应用, 导引头的抗电子干扰能力成为一项关键技术。雷达频率综合器作为雷达系统的核心部件, 其产生本振信号的质量对雷达系统的抗电子干扰能力具有决定性影响, 这对本振信号的跳频带宽、相位噪声、杂波抑制度、平坦度等参数指标提出了更高的要求。本文运用直接数字频率合成(DDS)技术和先进设计系统(ADS)仿真技术进行宽带阻抗匹配, 采取有效信号串扰隔离技术, 使雷达频率综合器的 X 波段本振信号的各项指标得到明显改善。通过实验测试, 本振信号可以实现快速跳频, 跳频带宽达到 500 MHz, 提高了雷达的抗干扰能力; 相位噪声优于 $-98 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$, 有效改善了雷达导引头的接收灵敏度。

关键词: 频率合成; 本振信号; 接收灵敏度; 宽带阻抗匹配

中图分类号: TN74

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020392

Design of X broadband and low phase noise radar frequency synthesizer

WANG Yujiang, ZHANG Bo, ZHAO Dajun, HUANG Junxiang

(Sichuan Institute of Aerospace Electronic, Chengdu Sichuan 610100, China)

Abstract: With the wide application of radar seeker on missile, the anti-jamming capability of the seeker is a key technology. The radar frequency synthesizer is the core part of radar system. The quality of local oscillator signal generated by radar frequency synthesizer shows a critical impact on the radar system's ability of confrontation and anti-confrontation. Therefore, it proposes higher requests on the parameters of the local oscillator signal including wideband hopping, phase noise, clutter suppression, flatness and so on. Based on Direct Digital Synthesizer(DDS) technology and Advanced Design System (ADS) simulation technology, broadband impedance matching is performed. The effective signal crosstalk isolation technology is adopted to improve the indexes of X-band local oscillator signal of the radar frequency synthesizer. Through experimental testing, the local oscillator signal can achieve fast frequency hopping, and the frequency hopping bandwidth reaches 500 MHz, which improves the anti-interference capability of the radar; the phase noise is better than $-98 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$, which effectively improves the receiving sensitivity of the radar seeker.

Keywords: frequency synthesis; local oscillator signal; receiving sensitivity; wideband impedance matching

随着弹载末制导雷达导引头技术的不断发展, 在复杂电磁干扰环境下, 对雷达导引系统的抗低截获概率和抗有源干扰的能力提出了更高要求。当前全相参雷达体制可通过多普勒频率获取目标的速度信息, 使雷达对目标识别从距离一维扩展到距离-速度二维, 提高了目标的发现概率。这种体制是实现频率捷变技术和线性调频技术的基础, 可产生复杂的信号波形, 提高雷达的低截获概率和抗有源干扰的能力^[1-3]。本文设计的雷达频率综合器不仅需产生不同的参考信号(主要包括参考时钟信号、信处采样信号、DDS工作时钟信号、上行信号、本振信号等), 还需将上行信号的线性调频瞬时带宽和接收本振信号跳频带宽同时进行扩展。较宽的瞬时带宽可以提高雷达的分辨力, 改善雷达探测精确度; 较宽的本振信号可以提高雷达的抗干扰能力^[4]。目前, 频率源合成方式主要包括直接模拟频率合成技术、间接频率合成技术、直接数字频率合成(DDS)技术。间接频率合成技术具有低杂散、低相噪的优点, 但其捷变时间较长, 无法满足捷变时间要求; 直接模拟频率合成技术具有工作频率高、相

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-11-22

位噪声极低、捷变时间短等优点；直接数字频率合成技术同样具有相位噪声低、捷变时间短等优点，但其工作频率较低，无法直接产生 X 波段信号。因此，本设计采用直接数字频率合成技术和直接模拟频率合成技术相结合的方式实现宽频带、低相噪的 X 波段雷达频率综合器^[5-6]。

1 直接频率合成技术

雷达频率综合器输出本振信号以 DDS 与直接模拟频率合成技术相结合的方式产生，不仅可以实现快速跳频，提高抗干扰能力，还可以通过改善相位噪声来提高雷达接收机的灵敏度。本设计通过 DDS 产生具有一定带宽的且输出功率稳定的输出信号作为参考源，该参考源再经过倍频器进行直接模拟频率合成，合成输出的信号经过高性能滤波器，以提高杂散抑制制度，从而提高输出信号的质量。

1.1 DDS 工作原理

DDS 是数字集成电路与微电子技术相结合的一种新型数控频率合成技术，具有频率分辨率高、频率捷变速度快、易于控制、输出信号稳定可靠等优点，在雷达频率源中得到广泛应用。根据 DDS 相位累加原理，在一个系统时钟周期内，不同的相位累加值可以得到不同的频率信号输出。若系统时钟频率为 f_c ，输出频率为 f_0 ，则：

$$f_0 = K \times \frac{f_c}{2^N} \quad (1)$$

由式(1)可知，在时钟频率一定的情况下，选择高位数的相位累加器，其分辨率更精确；取适当的相位增量值，可得到所需的输出信号频率。由于受奈奎斯特采样定理的限制，DDS 输出频率只能达到参考时钟的 40%，本设计选用 AD9914，其参考时钟高达 3.5 GHz，其输出频率可达 1.4 GHz，既节省了倍频次数，又减小了体积。

1.2 倍频器相噪分析

DDS 产生一定频率带宽的信号需要倍频器进行频率扩展，但信号在倍频过程中，会导致信号的相位噪声恶化。设倍频器输入信号和输出信号的相位噪声分别为 $L(Nf_0)$ 和 $L(f_0)$ ，根据倍频器相位噪声的理论分析可得，其频率合成的本振信号相位噪声恶化理论值为：

$$\frac{L(Nf_0)}{L(f_0)} = 20 \lg N \quad (2)$$

输入信号经过 N 次倍频或分频时，输出信号的相位噪声按照 $20 \lg N$ 程度恶化或改善。本文采用高稳恒温晶振，通过倍频器产生相噪较好的 DDS 参考时钟信号，再经过 DDS 内部分频器产生相噪极低的基频信号，基频信号运用直接频率合成技术，从而实现 X 波段信号的超低相噪输出。

2 接收灵敏度

雷达系统在各种噪声作用下引起系统输出信号相位的随机变化，对信号处理机接收信号检测精确度起决定性影响，从而影响雷达系统对目标的打击精确度。经过分析，本振信号的相位噪声边带会影响雷达接收机的灵敏度，对研究本振信号的相位噪声与灵敏度的关系^[7]，具有一定的参考价值。雷达工作灵敏度主要受限于接收机内部的热噪声和外部的干扰噪声。在本振信号源的相位噪声极低条件下，接收机的灵敏度主要由内部热噪声贡献，其计算公式为：

$$S_{\min} = kTFB_n M \quad (3)$$

式中： k 为玻兹曼常数： 1.38×10^{-23} J/K； T 为绝对温度，常温 290 K； F 为接收机噪声系数； B_n 为噪声等效带宽； M 为识别系数。假设雷达接收机参数 $F=10$ dB， $B_n=1$ MHz， $M=1$ ，则由式(3)可得，工作灵敏度 $S_{\min}=-104$ dBm。但实际环境中存在强大的信号泄漏和杂波干扰，本振信号的相位噪声边带由于混频作用而转移至信号泄漏和杂波干扰上，使信号泄漏和杂波干扰明显增强，这种外部噪声干扰影响较大，接收机的灵敏度主要由外部干扰噪声决定，其计算公式为：

$$S_{\min} = P_R + L(f) + 10 \lg(B_n) \quad (4)$$

式中： P_R 为本振信号泄漏功率绝对值； $L(f)$ 为本振信号的相位噪声。在泄漏功率和噪声等效带宽一定条件下，

接收机的灵敏度与本振信号存在线性关系，本振信号的相位噪声越低，则接收机灵敏度越高。

3 宽带信号阻抗匹配

宽带阻抗匹配是使回波损耗曲线 S_{11} 或 S_{22} 轨迹离史密斯圆图中心的距离尽可能短，尽量收敛于圆心。压缩回波损耗轨迹是实现宽带的有效方法。在史密斯圆图上，当一个电容或电感插入阻抗匹配网络时，阻抗曲线会发生位置变化。通过电容、电感并联组合或电容、电感串联组合会引起阻抗曲线发生变化，在阻抗匹配网络中对这 4 种阻抗变化特性进行配对，将回波损耗曲线进行完全匹配，实现能量传输最大化。实际工程中，射频信号输出端传输线是连续的，射频信号传输线两边都是铺铜接地处理，并不适合串联组合，因此在射频信号传输线上使用电容、电感并联组合进行宽带阻抗匹配，从而实现 X 波段本振信号的宽带阻抗匹配。

4 雷达频率综合器本振信号电路总体设计

雷达本振信号以 DDS 产生的带宽为 (600 ± 15.625) MHz 信号，跳频间隔为 0.625 MHz，作为基准源，通过 16 倍频器，产生带宽为 $(9\ 600 \pm 500)$ MHz、跳频间隔为 10 MHz 的输出本振信号，其产生原理如图 1 所示。本文通过运用直接频率合成技术的相关理论以及宽带阻抗匹配方法，最终设计出一种高性能宽带雷达频率综合器。

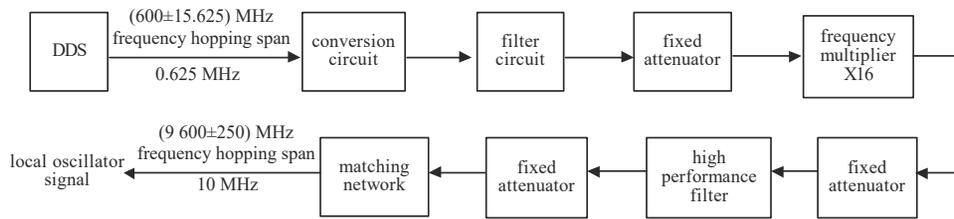


Fig.1 Schematic diagram of local oscillator signal generation

图 1 本振信号产生原理图

4.1 DDS 输出信号转换电路设计

AD9914 两路输出信号保证了输出电流信号的平衡，输出平衡能够降低数模转换器输出时潜在的共模噪声，提供较高的信噪比。但两路差分电流信号需通过接地电阻 R_1 和 R_2 ，将差分电流转换为差分电压信号，该信号再经过一个射频变换器 ADT1-1WT 把两路差分电压转为单端电压输出，便于对输出信号进行滤波、放大。射频变换器不仅具有差分电路转换功能，而且在 DDS 信号输出和滤波电路之间起到阻抗匹配作用，其工作带宽较宽，可应用在较宽频带的信号转换电路中。DDS 输出信号转换电路如图 2 所示。

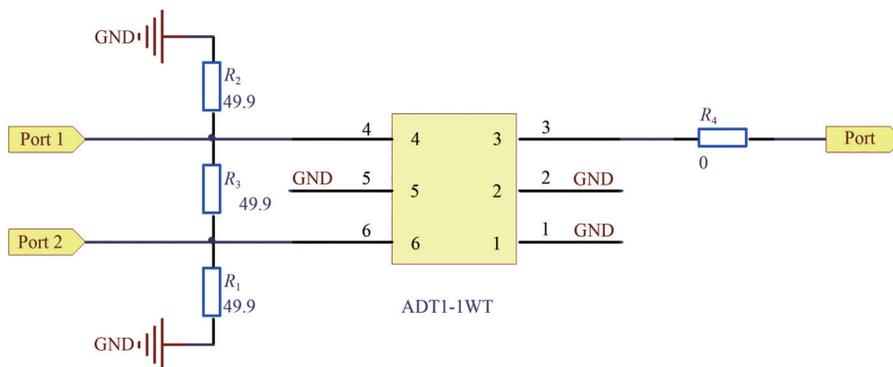


Fig.2 Circuit of DDS output signal conversion

图 2 DDS 输出信号转换电路

4.2 DDS 输出信号滤波电路设计

DDS 输出信号中含有较多的高次谐波，较大的杂散影响本振信号的质量，需对其进行滤除。由于杂波为高次谐波，信号频率较高，需要通过低通滤波将其进行滤除。根据低通滤波器的频率响应特性，可分为 Butterworth, Chebyshev, Elliptic, Bessel 四类滤波器。根据各型滤波器优缺点以及 DDS 输出稳定性等因素，最终采用 Chebyshev 型进行低通滤波电路设计^[8]，其截止频率 $f_c=650$ MHz，采用 7 阶滤波器滤波，输入/输出阻抗为 50Ω ，该型低通滤波器电路基于先进设计系统(ADS)仿真软件完成，仿真电路如图 3 所示。其低通滤波器的 S_{21} 参数如图 4 所示。

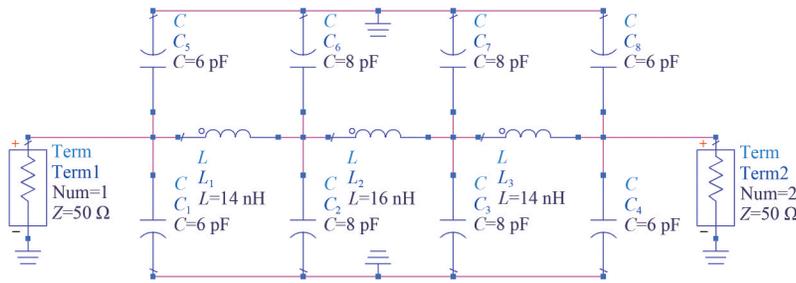


Fig.3 Simulation circuit of low pass filter
图3 低通滤波器仿真电路

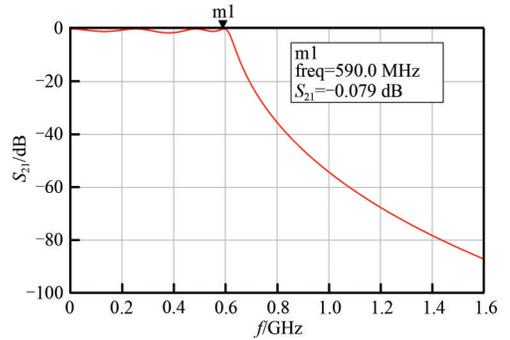


Fig.4 S_{21} parameter of low pass filter
图4 低通滤波器 S_{21} 参数

该低通滤波电路是对 Chebyshev 型电路的改进，Chebyshev 原型只有 4 个并联电容和 3 个串联电感，4 个电容值依次分别是 12 pF、16 pF、16 pF、12 pF，具有对称关系，将 4 个电容值进行分解，可以分解为 C_1 和 C_5 为 6 pF、 C_2 和 C_6 为 8 pF、 C_3 和 C_7 为 8 pF、 C_4 和 C_8 为 6 pF，通过这种并联电容一分为二的方式，增大了电容的数目，可减少因某个电容损坏而带给电路的影响，提高了电容容错率以及电路的稳定性。对 DDS 输出信号进行测试，在信号频率(600±15.625) MHz 范围内输出信号稳定且杂波抑制制度较好，满足设计指标要求，其指标如表 1 所示。

表 1 性能参数指标

Table 1 Performance parameter index

	performance parameters	
	of DDS output signal	of output LO signal
center frequency/MHz	600±15.625	9 600±250
output waveform	sine signal	sine signal
output power/dBm	≥-5	-13±2
phase noise	≤-125 dBc/Hz@1 kHz	≤-95 dBc/Hz@1 kHz
spurious/dBc	-50	-50
harmonic/dBc	-45	-45
load/Ω	50	50

4.3 倍频电路设计

本振信号是产生雷达发射信号和接收信号的基础信号，其相位噪声、工作带宽、杂散抑制制度等参数指标对整个雷达系统具有重要影响。本振信号通过 DDS 产生的输出信号经过 16 倍频产生，其输出参数指标如表 1 所示。16 倍频器选用 ADI 生产的 HMC445LP4 有源倍频器，该芯片的最大输出功率达到 5 dBm，满足输出功率设计要求。其输出频谱如图 5 所示，输出频谱各次谐波均在 20 dBc 以下，输出信号相邻的 15 和 17 次谐波可达 35 dBc 的抑制。为提高本振信号的杂散抑制制度，在 16 倍频器的输出端加一定制的(9 600±250) MHz 高性能带通滤波器，在工作频率范围内通带插损≤3 dB，通带波动≤1 dB，近端阻带抑制制度≥55 dB，远端阻带抑制制度≥40 dB，驻波系数≤1.5，输入/输出 50 Ω 阻抗匹配，并采用腔体结构装配，该带通滤波器实际 S_{21} 参数如图 6 所示，其参数满足指标设计要求。

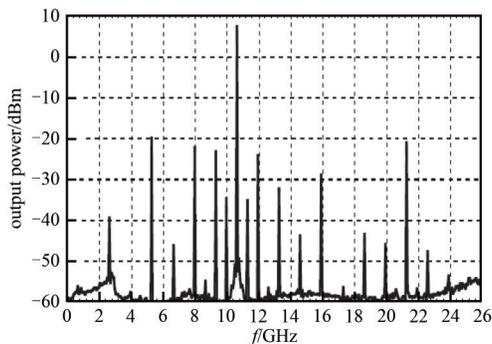


Fig.5 Output spectrum of frequency 16-multiplier
图5 16 倍频器输出频谱

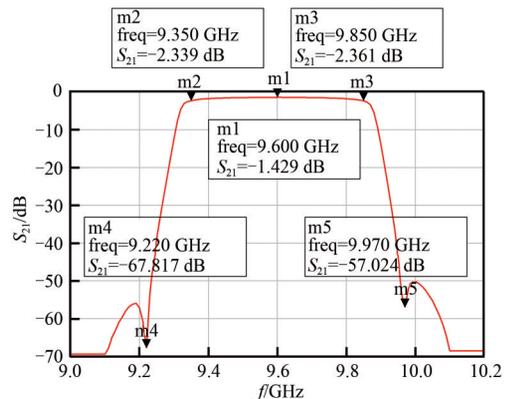


Fig.6 S_{21} parameter of band pass filter
图6 带通滤波器 S_{21} 参数

4.4 宽带阻抗匹配电路设计

利用 ADS 对倍频器输出阻抗进行匹配仿真，根据 ADI 官网提供的 16 倍频器 HMC445LP4 ORL.S1P 文件，倍频器输出阻抗匹配前曲线如图 7 所示，该倍频芯片输出阻抗在频率范围处于严重失配状态，输出损耗较大，无法满足输出功率要求，因此需要对输出端进行阻抗匹配，将阻抗匹配到 50 Ω 附近，使阻抗处于完全匹配状态，损耗

最小，从而达到输出能量的最大值。阻抗匹配网络采用当前最常用的史密斯圆图法，利用阻抗-导纳史密斯圆图的相关理论，进行阻抗和导纳之间的转化，导纳圆图适用于并联电路，阻抗圆图更适用于串联电路。在实际电路调试中，在射频信号走线上并联电容、电感更方便，更稳定，因此本设计选用导纳圆图的方式，并联电容、电感，实现阻抗匹配。

在阻抗-导纳史密斯圆图中，归一化阻抗与导纳可以相互转化，存在倒数关系。在导纳圆图中并联电感、电容，可沿等电导圆移动，引起电纳的变化。并联电感、电容归一化导纳关系式为：

$$Y = G - j \frac{Z_0}{\omega_0 L} \text{ (并联电感)} \quad (5)$$

$$Y = G + j Z_0 \omega_0 C \text{ (并联电容)} \quad (6)$$

式中： Z_0 为特征阻抗 50Ω ； ω_0 为阻抗匹配中心频率的角频率，且 $\omega_0 = 2\pi f_0$ ； G 为归一化电导； L, C 分别为电感、电容值。由图 7 可得，在中心频率 $9\ 600\ \text{MHz}$ 处的输出阻抗为 $Z_0 = 50 + j40$ ，归一化阻抗值为 $1 + j0.8$ ，可见输出阻抗呈现感抗，需并联电容（容抗）将其进行抵消，故输出归一化导纳值为 $0.61 - j0.49$ 。为增大电纳，需并联电容，由式(6)可得， $Z_0 \omega_0 C = 0.49$ ，在中心频率下的电容理论计算值为 $162\ \text{fF}$ ，此时感抗被容抗完全抵消，但此时阻抗值为 $30.5\ \Omega$ ，并不是 $50\ \Omega$ 阻抗匹配，因此继续增大电纳与 $50\ \Omega$ 等电阻圆相交，在相交点串联电感，将阻抗曲线拉到 $50\ \Omega$ 中心点附近，完成阻抗匹配，并在匹配电路中加入 LC 并联组合，实现宽带阻抗匹配。通过 ADS 仿真建立输出阻抗匹配仿真电路如图 8 所示，输出阻抗匹配后曲线在史密斯圆图中，其中心频率处的阻抗为 $50\ \Omega$ 阻抗匹配，其输出阻抗匹配后曲线如图 9 所示，匹配前后阻抗曲线分别用红、蓝色表示，匹配后的阻抗曲线集中于史密斯圆图中心，实现阻抗匹配。

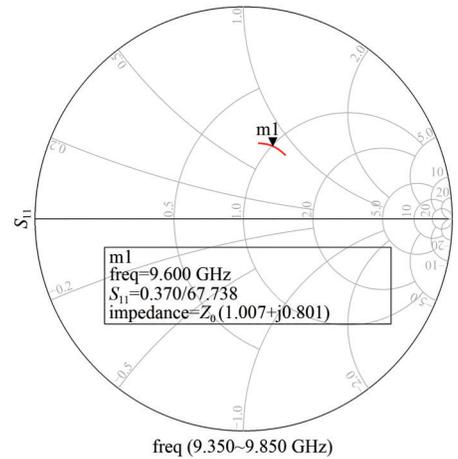


Fig.7 Output impedance curve before matching
图 7 输出阻抗匹配前曲线

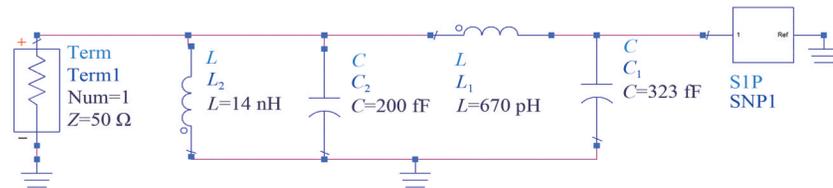


Fig.8 Simulation circuit of output impedance matching
图 8 输出阻抗匹配仿真电路

5 实验测试与分析

通过搭建实验测试平台，使用 9030A 频谱仪对雷达频率综合器的本振信号的功率、杂波、相位噪声等参数进行实测，其输出功率频谱图如图 10 所示，在 $500\ \text{MHz}$ 带宽内最大输出功率为 $-11.51\ \text{dBm}$ ，最小输出功率为 $-13.48\ \text{dBm}$ ，平坦度达到 ± 0.96 ，各个参数较好地满足设计指标要求。根据本振信号输出功率频谱图可得实测指标参数值与设计指标参数值对照表，如表 2 所示。由表 2 可知，所有测试值均满足指标要求，达到了预期效果。由于本设计采用金属隔离压条的方式提高信号间串扰隔离度，使杂散抑制制度达到 $55\ \text{dBc}$ 以上，信号串扰隔离度达到 $70\ \text{dBc}$ 以上，为雷达系统提供了高质量的本振信号。

本振信号的相位噪声如图 11 所示，可得其相位噪声曲线平稳，且在 $1\ \text{kHz}$ 条件下相位噪声为 $-98.8\ \text{dBc/Hz}$ 。可根据式(2)与 DDS 输出的相噪参数值，得到本振信号理论相位噪声 $L(f) \leq -125 + 20 \lg 16 = -101\ \text{dBc/Hz}@1\ \text{kHz}$ ，实测值接近于理论值，较大程度地满足了雷达系统的要求，提高了接收信号灵敏度，为进一步提高该性能参数保留空间提供了理论依据，为提高雷达探测精确度以及雷达成像清晰度提供了硬件电路实现低相噪的理论方法。

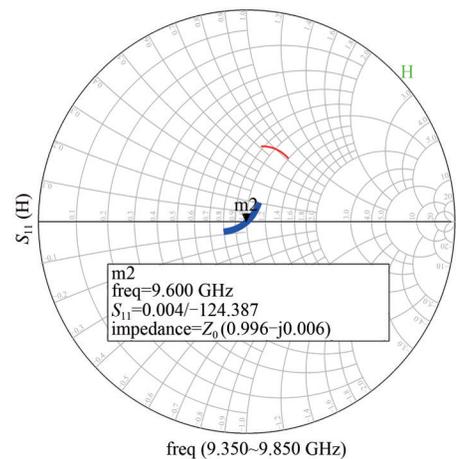


Fig.9 Output impedance curve after matching
图 9 输出阻抗匹配后曲线

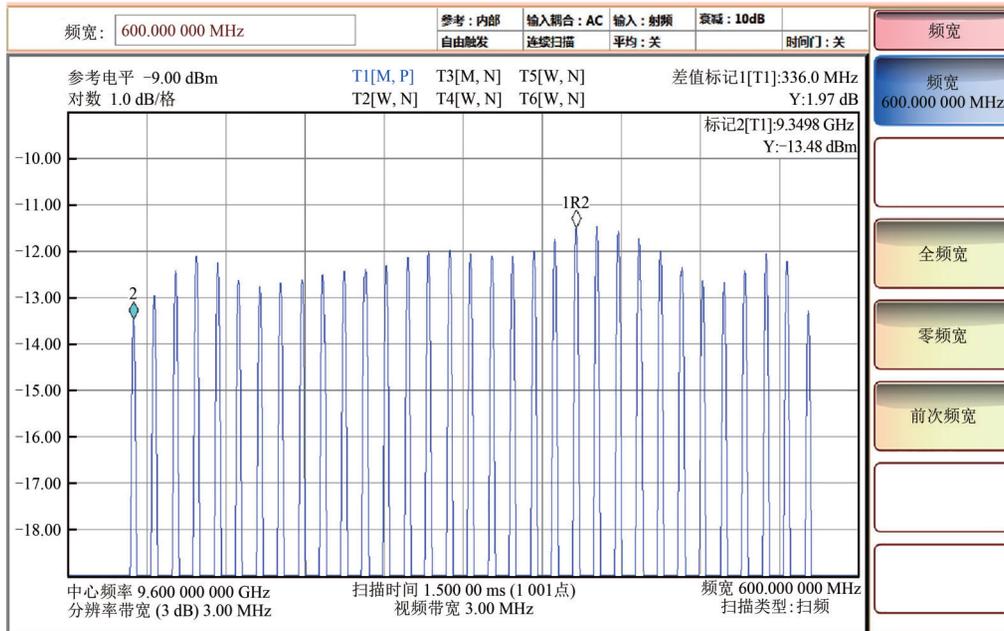


Fig.10 Power spectrum of output signal
图 10 输出信号功率频谱图

表 2 本振信号测试数据

Table 2 Test data of local oscillator signal

LO signal	index requirements	measured values
frequency/MHz	9 600±250	9 600±250
power/dBm	-13±2	-13±2
flatness/dB	≤±2	≤±1
spurious/dBc	≤-50	-55
harmonic/dBc	≤-45	-48
phase noise	≤-95 dBc/Hz@1 kHz	-98.8 dBc/Hz@1 kHz

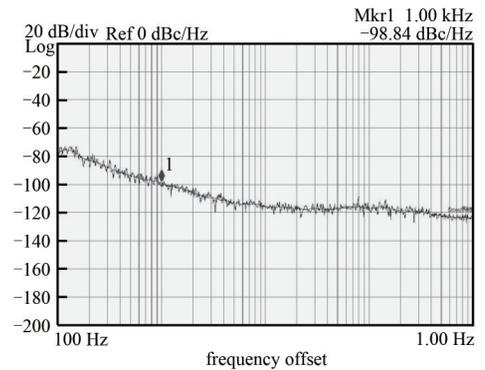


Fig.11 Phase noise of local oscillator signal
图 11 本振信号相位噪声

6 结论

雷达频率综合器使用 DDS 数字跳频技术产生一定带宽的跳变信号，使输出本振信号的跳频带宽更宽，相位噪声更低，提高了雷达导引头接收机灵敏度；运用宽带阻抗匹配方法，使本振信号跳频带宽达到 500 MHz，提高了雷达抗干扰能力；采用有效的信号串扰隔离屏蔽技术，信号串扰隔离度达到 70 dBc 以上，提高了输出信号的质量。因此，本文设计的高性能雷达频率综合器对当前弹载雷达导引头技术发展具有重要的应用价值。

参考文献：

[1] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2011. (DING Lufei,GENG Fulu,CHEN Jianchun. Radar principles[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2011.)

[2] 杜仕雄,田殷,杨杰,等. 线性调频雷达全相参技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5): 821-824. (DU Shixiong,TIAN Yin, YANG Jie,et al. Full coherent technology of linear frequency modulation radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):821-824.)

[3] 黄向清,黄世钊,漆德宁. 宽带全相参直接合成频综源设计[J]. 现代雷达, 2011,33(6):80-82. (HUANG Xiangqing,HUANG Shizhao,QI Dening. Design of wideband frequency synthesizer with full-phase-coherence[J]. Modern Radar, 2011,33(6):80-82.)

[4] 王栋. 弹载雷达导引头频率综合器技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009. (WANG Dong. Study on frequency synthesizer used in missile-borne radar seeker[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2009.)

[5] 刘元昆. 一种低相噪频率源的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (LIU Yuankun. Research and design of a low phase noise frequency source[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)

[6] 厉家骏. 快跳频率合成器的设计与实现[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2016. (LI Jiajun. Design and implementation of fast

- hopping frequency synthesizer[D]. Hangzhou,China: University of Electronic Science and Technology of Hangzhou, 2016.)
- [7] 胥鑫. 微波毫米波雷达频率源关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (XU Xin. Study on microwave and millimeterwave radar frequency synthesizer[D]. Chengdu,China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [8] 刘飞,张竺君. 高阶 Chebyshev 低通滤波器的快速设计[J]. 黑龙江科技信息, 2012(18):15-16. (LIU Fei,ZHANG Zhujun. A quick design method provided for the high order Chebyshev low pass filter[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(18):15-16.)

作者简介:

王玉江(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事雷达系统射频电路设计 .email:1522916824@qq.com.

(上接第 574 页)

- [11] JOYE C D,CALAME J P,GARYEN M,et al. UV-LIGA microfabrication of 220 GHz sheet beam amplifier gratings with SU-8 photoresists[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010(20):1-13.
- [12] SHIN Y M,BARNETT L R,GAMZINA D,et al. Terahertz vacuum electronics circuits fabricated by UV lithographic molding and deep reactive ion etching[J]. Applied Physics Letters, 2009,95(18):181505.
- [13] MASHANOVICH G Z. Electronics and photonics united[J]. Nature, 2018(556):316-318.
- [14] ATABAKI A H,MOAZENI S,PAVANELLO F,et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. Nature, 2018(556):349-354.
- [15] SONG H. Packages for terahertz electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2017,105(6):1121-1138.
- [16] MUNK B A. Frequency selective surfaces-theory and design[M]. New York,NY,USA:Wiley, 2000.
- [17] BARRERA M A R,CARPES W P. Bandwidth for the equivalent circuit model in square-loop frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(11):5932-5939.
- [18] FERREIRA D,RAFAEL F S,CUINAS I,et al. Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(9):3947-3955.

作者简介:

王亮(1994-), 男, 安徽省亳州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波及太赫兹器件 .email:wangliang111@mail.hfut.edu.cn.

张娜(1995-), 女, 安徽省安庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波及太赫兹器件.

邹睿智(1996-), 男, 江西省九江市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波及太赫兹器件.