

色散特性对毫米波频率步进雷达影响的研究

吴涛, 唐小宏, 王玲, 肖飞

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】对影响毫米波频率步进雷达分辨率的主要因素进行了分析。除目标速度以外,为毫米波频率步进雷达提供频率信号的频率源的色散特性也会对雷达分辨率造成恶化影响。微波频段上的色散特性会被搬移到毫米波频段,导致毫米波发射信号和本振信号的初始相位差不为常数,对雷达系统尤其是距离分辨率造成严重影响。仿真结果与实验结果一致。为了抵消色散特性对雷达分辨率的恶化影响,可以通过对色散特性的补偿来实现。色散特性补偿的方法被应用到实现W波段频率步进频率源的设计中,满足了0.45 m距离分辨率的要求。

关键词 色散特性; 高分辨力雷达; 毫米波; 频率步进
中图分类号 TN957 **文献标识码** A

Effect of Dispersion to Millimeter Wave Stepped Frequency Waveforms Radar

WU Tao, TANG Xiao-hong, WANG Lin, and XIAO Fei

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

Abstract As one of high-resolution radars, millimeter wave stepped frequency waveforms radar is successfully and widely used in many military applications. Main factors affecting the performance of radar are analyzed. Apart from target velocity, the dispersion of frequency synthesizer providing signals to radar also deteriorates the performance of radar. Specifically speaking, the dispersion in microwave band will be transferred to millimeter-wave band, this will result in the fact that the initial phase difference between transmitter and local oscillator is not constant, and brings bad impact on the resolution of radar. In order to ameliorate such effect, one possible way is to compensate dispersion. In this paper, an effective way to compensate dispersion is successfully applied in the design of a W-band stepped frequency waveforms radar. The final experiment shows that it can meet the requirement of 0.45 m range resolution.

Key words dispersion; high resolution radar; millimeter wave; stepped frequency waveforms

1 频率步进雷达一维成像过程

毫米波频率步进雷达(millimeter wave stepped frequency waveforms radar)与普通毫米波脉冲雷达相比,其特点在于工作带宽不变的情况下,距离分辨率被大幅度地提高,从而成为研发的热点^[1],如95 GHz相参雷达(HIPCOR-95)^[2]和FGAN公司的MEMPHIS^[3]。与调频连续波(frequency modulation continuous wave, FMCW)雷达相比^[4],频率步进雷达的硬件设计更为复杂,对雷达系统中频率源的设计提出了更高的要求。

利用快速傅里叶逆变换(inverse fast fourier transform, IFFT)实现频率步进雷达一维成像的过程如下:在自由空间中,发射机发射 n 个脉宽为 τ 、载

频步长为 Δf 的脉冲串,各载频分别为 $f_i=f_0+i\Delta f$,其中, $i=0,1,2,\dots,n-1$,重复周期为 T ,这 n 个脉冲的步进总带宽 $B=(n-1)\Delta f$ 。发射的信号遇到距离为 R 、径向速度为 v 的目标后,反射回超外差结构的接收机,经过一次或多次下变频,进行正交采样;最后对采样数据 G_i 作 n 点IFFT后,所得复合距离分布复数形式的幅度 $|H_l|$ 即目标的一维距离像为^[5]:

$$|H_l| = |\text{IFFT}(G_i)| = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} G_i \exp\left(j \frac{2\pi l i}{n}\right) \right| \quad (1)$$
$$0 \leq l \leq n-1$$

2 影响距离分辨率的因素

对于单个目标,第 i 个发射脉冲所产生的基带回

收稿日期: 2007-04-12; 修回日期: 2007-09-27

基金项目: 教育部新教师基金(20070614034)

作者简介: 吴涛(1980-),男,博士生,主要从事微波、毫米波有源电路及毫米波前端系统等方面的研究。

波响应的复数采样,对幅度归一化以后可表示为:

$$G_i = \exp \left\{ j \left[-2\pi f_i \left(\frac{2R}{c} - \frac{2v}{c} \left(iT + \tau + \frac{2R}{c} \right) \right) + \Delta\theta_i \right] \right\} \quad (2)$$

式中 $\Delta\theta_i$ 为收发信号的初始相位差;自由空间中电磁场为TEM模式传播,其相速等于光速 c ;采样的时间为 $iT + \tau + 2R/c$ 。

在理想情况下,频率步进雷达的距离分辨率为:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

式中 ΔR 主要由频率的总带宽 B 决定,但是会受其他干扰项影响,即目标的径向速度 v ,来自目标本身特性^[6];收发初始相位差 $\Delta\theta_i$,来自频率步进雷达中频率源的硬件设计。

消除目标的径向速度 v 所带来的影响有多种方法^[7],一般是将基带回波信号乘以速度补偿因子 ζ_i ,以此减小速度对距离测量的模糊影响,即有:

$$\zeta_i = \exp \left\{ j \left[-2\pi f_i \frac{2\tilde{v}}{c} \left(iT + \tau + \frac{2\tilde{R}}{c} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

式中 \tilde{v} 和 \tilde{R} 分别为目标径向速度和距离的估值。在信号传输过程中,收发初始相位差 $\Delta\theta_i$ 主要是由网络的延迟造成的。一个网络的延迟特性可以根据该网络的插入相位定义为信号频率的一个函数。如果用 $\tau_p(f)$ 表示网络与频率相关的相位延迟,则插入相位为:

$$\phi(f) = -2\pi f \tau_p(f) \quad (5)$$

插入相位 $\phi(f)$ 会叠加到输出信号中,并且这种相位叠加会随非线性效应而搬移和恶化。

在频率源设计中收发通道会对称设计,这样在理想情况下,收发初始相位差 $\Delta\theta_i$ 为常数。但是由于发射和接收本振信号为宽频带信号,并且在频率源中为了获得更好的频率响应会使用大量的滤波器,一般较难实现宽频带信号的线性相位响应;此时网络对信号的相移延迟 $\tau_p(f)$ 不为常数,导致收发初始相位差 $\Delta\theta_i$ 不为常数。

3 色散特性对雷达的性能影响分析

本文假设目标的径向速度 v 对雷达系统带来的影响已由上述提到的通过引入速度补偿因子后完全消除,仅考虑频率源设计对雷达分辨率的影响,有:

$$G_i = \exp \left\{ j \left[-2\pi f_i \frac{2R}{c} + \Delta\theta_i \right] \right\} \quad (6)$$

对于给定的频率步进雷达频率源,其收发初始相位差 $\Delta\theta_i$ 仅与雷达频率源设计中的发射和接收通

道有关,并且存在确定的变化关系。W波段脉间频率步进雷达的频率源方案如图1所示, $f_0=94$ GHz, $\Delta f=4$ MHz, $n=128$,发射信号经过开关实现脉冲信号。接收机由3个部分组成:(1)第一本振为频率步进本振,与发射信号保持恒定的频率差3 GHz;(2)第二本振用于将回波中频信号进行第二次下变频;(3)第三本振为正交采样提供本振信号。所有的信号依赖于同一个参考晶振,以实现频率的相参性。

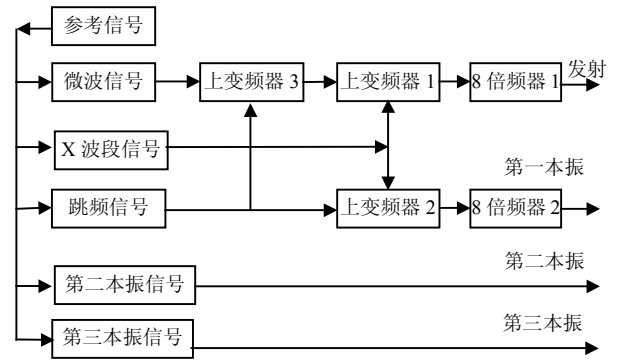


图1 W波段脉间频率步进雷达的频率源方案

在频率源方案中,参考信号选用120 MHz,第二本振信号2.94 GHz和第三本振信号60 MHz由参考信号锁相产生,微波信号选用锁相输出375 MHz,X波段信号选用锁相输出10 GHz为上变频1和上变频2提供本振,跳频信号输出频率为1.375 0~1.438 5 GHz。经过频率组合,获得的X波段信号再经8次倍频器后,输出W波段的发射和第一本振信号。采用倍频方式获得W波段信号比W波段直接振荡能获得更好的指标^[8]。单点频信号采用锁相技术来提高信号质量,输出频率比倍频方式灵活^[9]。跳频信号一般用直接数字频率合成(DDS)和间接频率合成相结合的方式获得^[10]。

如果用 $\phi(i)$ 表示对第 i 个序列的插入相位,有:

$$\Delta\theta_i = \left[8\phi_{\text{上变频器1}}(i) + 8\phi_{\text{上变频器3}}(i) \right] + \phi_{\text{8倍频器1}}(i) - \left\{ 8\phi_{\text{上变频器2}}(i) + \phi_{\text{8倍频器2}}(i) + \theta_{\text{第二本振}} + \theta_{\text{第三本振}} \right\} \quad (7)$$

式中 减号前为发射网络的插入相位;减号后为接收网络的插入相位。

对于相同功能的微波电路,如果采用完全相同的电路原型结构,中心频率不一样,则网络的插入相位应该是一样的。频率源中的上变频器由混频器和滤波器构成,混频器因为是三端口网络,其插入相位除了混频器本身的延迟以外,还包括用于混频的另一路信号的初始相位。一般情况下混频器本身产生的相位延迟非常小,对于图1的情况,2个X波段上变频器组件的插入相位是一样的;在频率源方

案中,用于上变频的微波信号、X波段信号和第二、第三本振信号均为点频信号,其初始相位会因为频率合成方案采用直接或间接频率合成,无论与参考信号初始相位有无关系,其均为常数。对于二端口,如果将插入相位与网络的散射参数[S]联系起来,有:

$$\Delta\theta_i = 8\phi_{\text{上变频器3}}(i) + C = 8\angle S_{\text{滤波器3}} 21(i) + C \quad (8)$$

式中 C为任意常数。将式(6)、(8)带入式(1)可得:

$$|H_l| = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \exp \left\{ j \left(\frac{2\pi l i}{n} - 2\pi f_i \frac{2R}{c} + 8\angle S_{\text{滤波器3}} 21(i) \right) \right\} \right| \quad (9)$$

$0 \leq l \leq n-1$

从式(9)可以看出,式(8)中的常数项对目标距离像没有任何影响。所以,收发通道中允许存在色散特性,只要色散特性能够相抵消就不会对目标距离像造成影响;并且前端中用于频率组合的各种点频信号的初始相位对雷达分辨率也没有影响。因此,对雷达分辨率会带来影响的是收发通道中没有抵消的插入相位,如图1中所示的上变频器3中的滤波器3。滤波器3是中心频率1.78 GHz、相对带宽为4%的三阶Chebyshev型阶梯阻抗谐振器(SIR)滤波器^[10],其S21频响特性如图2所示。

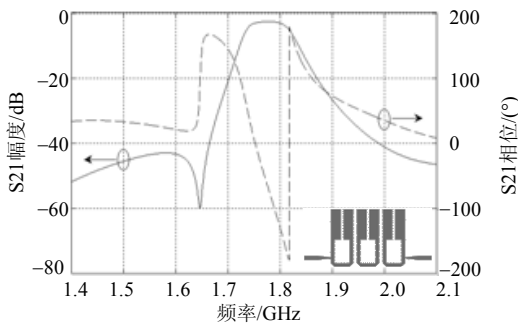


图2 滤波器3的S21频响特性与电路结构

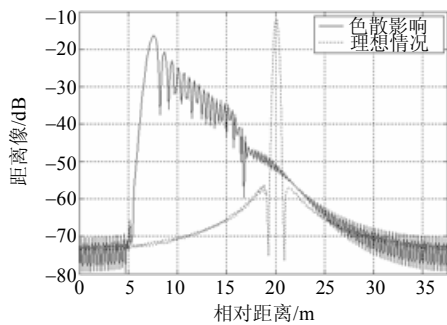


图3 色散特性对频率步进雷达的影响

当对相对距离为20 m的单目标进行分析时,频率步进雷达的距离像仿真结果如图3所示。由图3可见,目标一维距离像被严重恶化,不仅输出信号幅度降低,相对距离还发生了偏移,并且输出展宽造

成距离分辨率下降。

4 色散特性对雷达的性能影响实验

根据图1所示的方案,本文研制了一套W波段频率步进雷达频率源。由前面的分析可知,用于频率组合的点频信号的初始相位对雷达分辨率没有影响,因此前端中的点频信号全部采用间接频率合成方式,大大简化设计方案和体积,方便系统集成。频率源方案中的跳频信号的初始相位经收发通道后会相互抵消,也不会对雷达系统造成影响。

该W波段频率步进雷达频率源工作在W波段,它的发射频率为94.000~94.508 GHz,工作带宽为508 MHz,载频步长为4 MHz,共128个捷变频点。

对实际单个静止目标进行测量,经信号处理器处理后输出的目标一维距离像如图4所示。

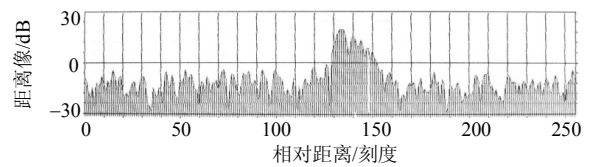


图4 实测的静止单目标一维距离像

在图4中,横坐标的每个刻度对应的相对距离为0.146 5 m,满刻度为256时对应的最大不模糊距离为37.5 m。从图中可以看出,因为收发通道色散特性没有完全抵消,造成对单个目标距离像展宽,ΔR严重恶化,其结果与分析结果比较吻合。而基底噪声的恶化是由于随机的频率误差造成的。

若要抵消发射通道上的色散影响,可以在接收通道上增加相应的色散网络滤波器4,如图5所示。

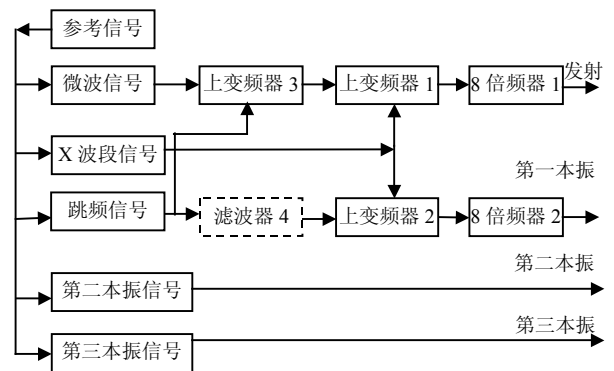


图5 具有色散特性补偿的频率源方案

滤波器4的引入对频率源信号的杂波抑制、相位噪声等指标无明显的影响,仅仅是补偿发射通道上的色散特性。并且由前面的分析可知,滤波器4的设计必须与滤波器3具有相同的原型电路结构,才能做

到收发色散特性完全抵消。图6a所示为增加了中心频率为1.405 GHz的SIR滤波器后单目标的输出结果。当2个目标距离0.45 m时能清楚地进行分辨,如图6b所示。

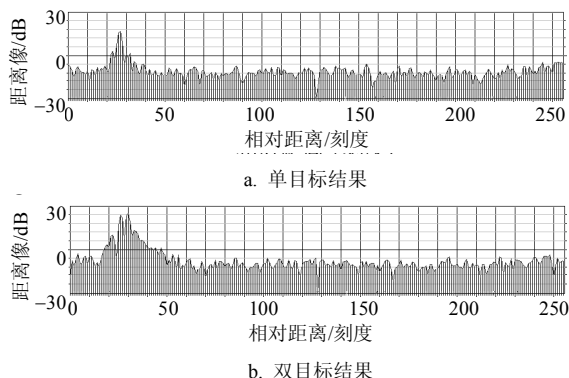


图6 进行收发通道色散补偿后的结果

由图6可以看出,频率源设计中的色散特性主要由滤波器产生,可通过在接收通道上增加相应的滤波器进行相位补偿,大幅度地改善一维距离像。该W波段频率步进雷达频率源的距离分辨率实测为0.45 m,没有达到理想的0.30 m。其主要原因是发射通道上的射频开关和上变频器3中的混频器等网络的非线性相位延迟没有被完全抵消。

5 结束语

毫米波频率步进雷达在现代雷达中发挥着重要的作用,被广泛应用于军事领域。作为一种高分辨力雷达,其分辨率由频率带宽所决定,但会受到来自目标特性的目标径向速度和频率源设计的色散特性影响。本文就色散特性对毫米波频率步进雷达分辨率的影响进行了仿真分析和实验验证,提出频率源设计中宽带收发网络的色散特性如果能相互抵消,或者用于频率组合中的点频信号处于任意初始相位时,它们对雷达分辨率没有任何影响。通过对色散特性的补偿设计,实现了满足0.45 m距离分辨率要求的W波段频率步进频率源。

参 考 文 献

[1] 刘 静, 李兴国, 顾玉辉. 频率步进雷达关键技术的研究[J]. 制导与引信, 2003, 24(4): 24-28.

- LIU Jing, LI Xing-guo, GU Yu-hui. Research on key techniques of millimeter wave stepped-frequency high resolution radar[J]. Guidance & Fuze, 2003, 24(4): 24-28.
- [2] BUTTERWORTH J C. A high power coherent 95 GHz radar (HIPCOR-95)[J]. IEEE MTT-S Digest, 1987, 87(1): 499-502.
- [3] MEAL H, INSULT H, BOEHMSDORFF S, et al. MEMPHIS-a fully polarimetric experimental radar[C]// IGARSS 2002. New York, USA: IEEE, 2002.
- [4] ESSEN H, WAHLEN A, SOMMER R, et al. Very high bandwidth millimeter-wave radar[J]. Electronics Letter, 2005, 41(22): 1247-1249.
- [5] LANGMAN A, INGGS M R. Pulse versus stepped frequency continuous wave modulation for ground penetrating radar[C]//IGARSS 2001. New York, USA: IEEE, 2001.
- [6] 徐 泳, 马 林. 目标径向运动对步进频率雷达影响的分析与仿真[J]. 现代雷达, 2005, 27(12): 49-52.
- XU Yong, MA Lin. Analysis and simulation of effect of object motion on SF radar[J]. Modern Radar, 2005, 27(12): 49-52.
- [7] 龙 腾. 频率步进雷达信号的多普勒性能分析[J]. 现代雷达, 1996, 2(4): 31-37.
- LONG Teng. Doppler performance analysis of frequency stepped radar signal, modern radar[J]. Modern Radar, 1996, 2(4): 31-37.
- [8] ZHANG Yong-hong, TANG Xiao-hong, FENG Zheng-he. The investigation of W-band solid-state frequency sources[C]//ICMMT 2002. Beijing: IEEE, 2002.
- [9] 钟催林, 肖化武, 李军红. 采用PLL技术的合成频率源设计[J]. 国外电子元器件, 2006, 5: 12-15.
- ZHONG Cui-lin, XIAO Hua-wu, LI Jun-hong. Design of synthesis frequency source using phase-locked loop technology[J]. International Electronic Elements, 2006, 5: 12-15.
- [10] 孙长贵, 李兴国, 娄国伟. 脉间Costas FH高分辨毫米波雷达信号的DDS实现[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6): 473-476.
- SUN Chang-gui, LI Xing-guo, LOU Guo-wei. Implementation of inter-pulses costas FH high resolution MMW radar signal using DDS technology[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 21(6): 473-476.
- [11] MAKIMOTO M, YAMASHITA S. Bandpass filters using parallel coupled stripline stepped impedance resonators [J]. IEEE Trans on MTT, 1980, 28(12): 1413-1416.

编辑 黄 莘