

文章编号: 1001 - 893X(2010)08 - 0067 - 04

一种 W 频段频率步进雷达频率源的相位补偿方法^{*}

毕 波¹, 张永杰¹, 李 民², 朱淮城¹

(1. 北京遥感设备研究所 毫米波系统技术研究重点实验室, 北京 100039; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘 要:介绍了频率步进雷达信号实现距离高分辨的工作原理。针对采用步进频信号的某 W 频段末制导雷达在系统调试过程中, 由于频率源本振和激励源不同频点的相位差不同造成距离像畸变的情况, 分析了信号相位变化对高分辨距离像的影响, 根据步进频信号距离高分辨的原理, 提出一种对各频点间相位差进行相位补偿的方法。计算机仿真结果表明其可行性, 并在试验中对该方法进行了验证。通过该方法可以不用对步进频信号各频点的相参性过高要求, 即可得到高分辨距离像, 达到理想的距离分辨率, 有效降低了 W 频段频率源设计和调试的难度。

关键词: W 频段; 频率步进雷达; 距离高分辨; 相位补偿

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.014

Phase Compensation for Frequency Synthesizer of a W - band Stepped Frequency Radar

BI Bo¹, ZHANG Yong-jie¹, LI Min², ZHU Huai-cheng¹

(1. National Key Laboratory of Millimeter Wave System, Beijing Institute of Remote - Sensing Equipment, Beijing 100039, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The theory of using the stepped frequency radar signal to acquire high range resolution is introduced in this paper. Considering the aberrance of range profile in the W - band stepped frequency radar system test, which is caused by the phase variation between local oscillator and excitation source at different frequency points, the effect of phase variance on high resolution range profile is analysed, and a phase compensation method at each frequency point is proposed based upon the principle of high resolution range profile using stepped frequency. The feasibility of this method is proved by Matlab simulation with real data acquired, and verified in the following radar test. Moreover, this method requires no high coherence among various frequencies to obtain high resolution range profile, so it can effectively reduce the difficulty in W - band frequency synthesizer design and tuning.

Key words: W - band; stepped frequency radar; high range - resolution; phase compensation

1 引 言

雷达系统采用距离高分辨信号具有很多优点, 如提高跟踪精度、分辨目标要害部位等。频率步进信号是一种重要的距离高分辨率雷达信号, 它由一组载频线性跳变的脉冲信号组成, 具有大时宽带宽

的特性, 且瞬时带宽较窄, 是一种实用和易于工程实现的雷达信号, 因此近年来受到了广泛的关注。文献[1 - 3]对步进频信号距离高分辨的原理进行了分析。由于频率步进信号是利用各频点回波信号的相位信息得到高距离分辨率, 因此频率步进信号对相位变化非常敏感, 信号相位的变化会造成距离分辨率下降、信噪比损失和距离像畸变的现象。

^{*} 收稿日期: 2010 - 03 - 05; 修回日期: 2010 - 05 - 10

一般频段雷达的器件工艺技术成熟,硬件上可以保证各频点间信号的相参性,因此很少出现由于频率源各频点信号不相参引起的分辨率下降。本文所述雷达工作在 W 频段(波长为3 mm),采用步进频信号合成宽带获得高距离分辨率,在系统调试过程中出现了距离像畸变的情况。由于 W 频段雷达频率高,在频率源的设计上也与其它频段有所不同,且缺乏相应的仪器设备,因而要确保各频点的相参性,硬件调试难度大,周期长,随机性强。针对这种情况,本文根据步进频信号距离高分辨的原理提出一种在信号处理中对各相位频点进行补偿的方法,并进行了仿真和试验验证。

2 信号处理无法正常成像的原因分析

2.1 系统组成及出现的问题

雷达系统框图如图 1 所示,该雷达为 W 频段主动雷达,在近距离步进频体制下,采用正负跳频的方式,即前一帧为上跳频,后一帧为下跳频,一帧的跳频点数为 64 点。经本振混频后的中频信号为 60 MHz,采用中频采样并进行后续信号处理。

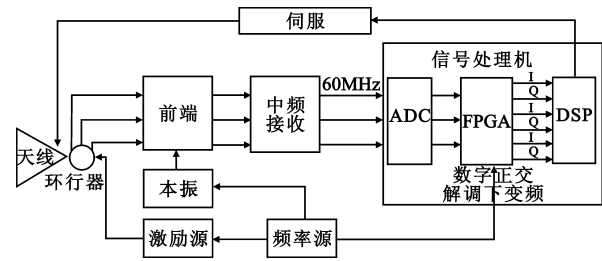


图 1 W 频段雷达系统框图
Fig.1 System block diagram of the W - band radar

在雷达室内试验中,发现对单一静止点目标成像出现主瓣展宽、距离像畸变现象,图 2 为上位机观测的成像图。图 3 为针对相位差 $\Delta\varphi_k$ 的不同情况进行仿真的结果。

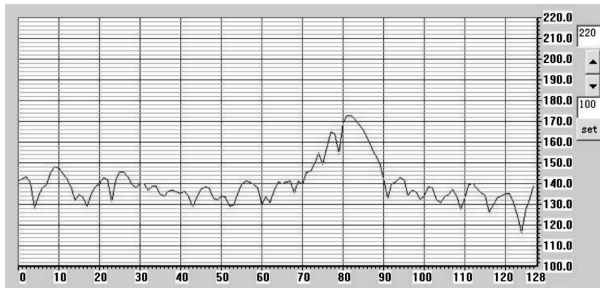
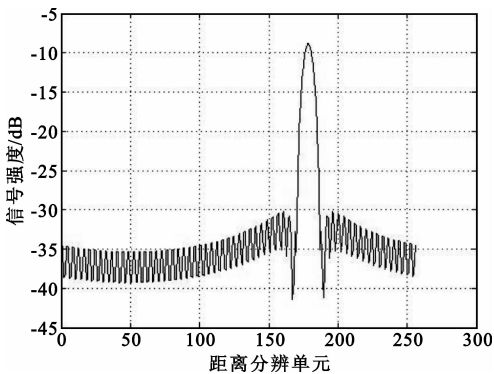
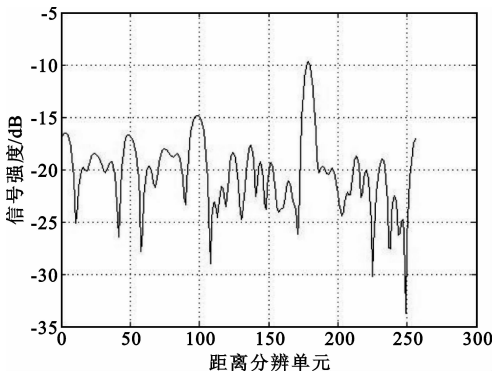


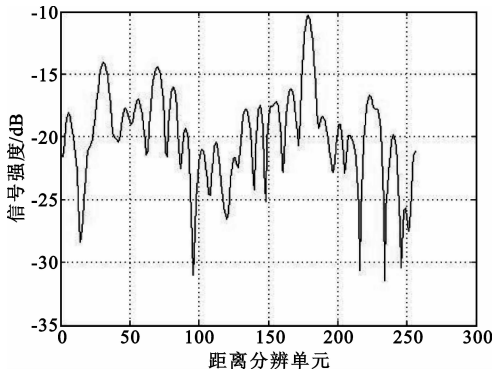
图 2 畸变距离像
Fig.2 Aberrant range profile



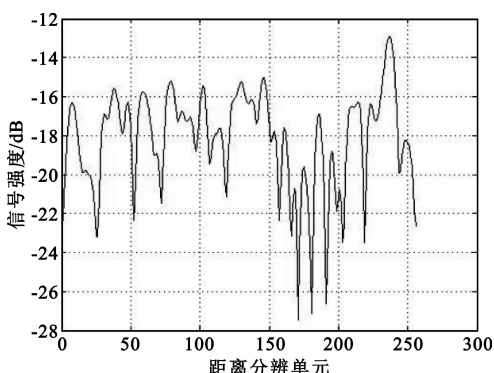
(a) $\Delta\varphi_k$ 为固定值



(b) $\Delta\varphi_k \in (-\pi/3, \pi/3)$ 的随机值



(c) $\Delta\varphi_k \in (-\pi/2, \pi/2)$ 的随机值



(d) $\Delta\varphi_k \in (-\pi, \pi)$ 的随机值

图 3 $\Delta\varphi_k$ 不同情况对成像的影响
Fig.3 Effect of different $\Delta\varphi_k$ on range profiles

2.2 原因分析

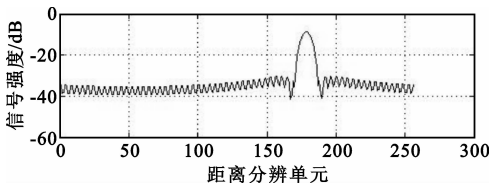
分析原因,定位于激励源和本振部分的滤波器由于中心频点不一样,从而导致相同频点的相位特性不一致,而这种不一致经过后面的倍频放大后更加恶化,造成频率源发射部分和本振部分在不同跳频点上的相位差 $\Delta\varphi_k$ 不一致,造成回波的相位不相参,以至于信号产生幅度下降和展宽。

下面针对 $\Delta\varphi_k = \varphi_{tk} - \varphi_{sk}$ 的不同情况进行仿真,仿真均采用 256 点,加汉明窗,采用的信号参数为跳频点数 64 点、频率间隔 8 MHz。仿真分为 $\Delta\varphi_k$ 为固定值, $\Delta\varphi_k \in (-\pi/3, \pi/3)$ 的随机值, $\Delta\varphi_k \in (-\pi/2, \pi/2)$ 的随机值, $\Delta\varphi_k \in (-\pi, \pi)$ 的随机值 4 种情况。仿真结果如图 3 所示。可以看出, $\Delta\varphi_k$ 的影响导致距离分辨率下降、信噪比损失和距离像畸变等问题。

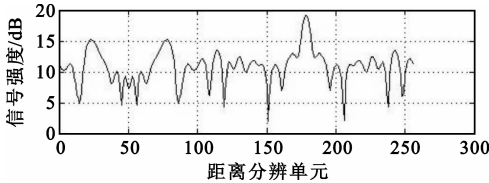
3 补偿方法

由于雷达工作在 W 频段,工作载频高,难以保证相位变化的一致性。在频率源高频部分进行相位一致性的调试难度大、周期长。通过在示波器上观测中频信号发现,各频点的相位是固定的,所以可以采用在信号处理机中对各频点的回波相位进行补偿的方法,从而降低硬件设计和调试的难度。

同时我们注意到,真实的 $\Delta\varphi_k$ 在个别频点可能存在超过一个周期而出现相位模糊的情况,即 $\Delta\varphi_k > 2\pi$,而计算相位差时,我们得到的结果都是在 2π 之内的。如图 4 所示,如果相位差超过 2π 时,在补偿时是不能被忽略的,否则同样不能得到正确的距离像。根据频率源器件的特性,可以推断出其相位差变化的曲线应该是平滑的,所以如果有跳变点,就要根据曲线对其进行分析加上 2π 或减去 2π 。



(a) 对相位模糊周期进行补偿



(b) 不对相位模糊周期进行补偿

图 4 对相位模糊周期补偿前后的成像对比
Fig.4 Range profile comparison before - and - after compensation in phase ambiguity period

3.1 补偿的具体步骤

补偿的具体步骤如下:

(1)对采样的 I、Q 两路信号数据求模,确定最大值点的采样点,即信噪比最强的采样点;

(2)再用此采样单元数据,利用公式 $\psi_k = \text{tg}^{-1}(Q/I)$ 及 I、Q 的符号,得出回波各频点相位值;

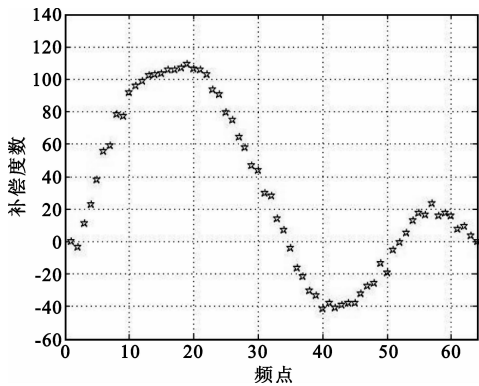
(3)多次采样取各频点间相差 $\Delta\psi_k = \psi_k - \psi_{k-1}$,取平均得到各点的平均相位差 $\overline{\Delta\psi_k}$,将 $\overline{\Delta\psi_k}$ 相加,再求平均,得到 θ ,以此值作为理想相位差 $\Delta\psi = 2\pi \times \Delta f \times (-2R/c)$ 的值,其中 Δf 为调频间隔, R 为弹目距离;

(4)求得各相位差相对理想相位差的差值 $\Delta_k = \overline{\Delta\psi_k} - \theta$ (其中 $\Delta_0 = 0$),第 k 点的补偿值就是 $\mu_k = \sum_{i=0}^k \Delta_i$;

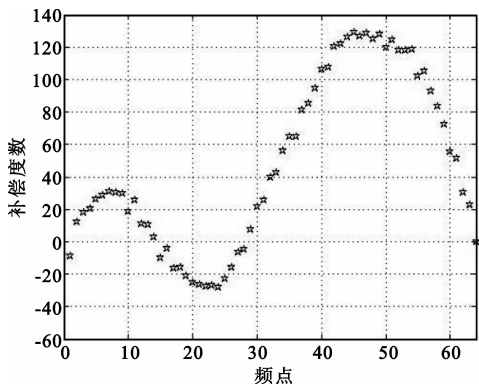
(5)各频点的回波在做 IFFT 之前先乘以 $\exp(-j\mu_k)$,然后再进行相应的信号处理。

3.2 实测的补偿值

实测补偿值如图 5 所示。



(a) 上跳频补偿值



(b) 下跳频补偿值

图 5 上下变频的补偿值
Fig.5 Compensation value for up - and - down frequency conversion

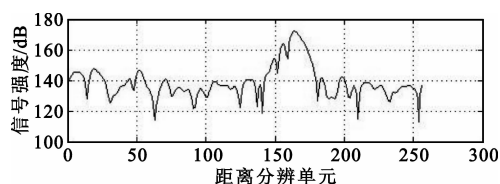
3.3 补偿方法存在的问题

这种补偿方法的一个问题是会造成距离测量的系统误差,但这个可以通过系统调试标校掉,对系统的性能没有影响。

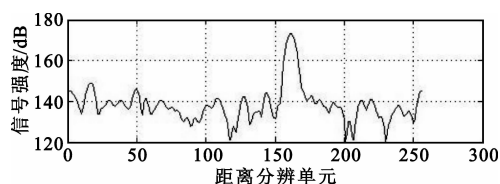
4 补偿方法的仿真和试验验证

4.1 Matlab 仿真

对信号处理机中采到的原始数据进行仿真,结果如图 6 所示,(a)和(b)分别为没采用补偿算法和采用补偿算法的。



(a) 补偿前距离像



(b) 补偿后距离像

图 6 实测数据仿真——补偿前后距离像比较

Fig.6 Real range profile comparison before - and - after compensation

4.2 试验验证

在 DSP 的算法中补偿后,从上位机观测,如图 7 所示,其结果和仿真结果基本一致。

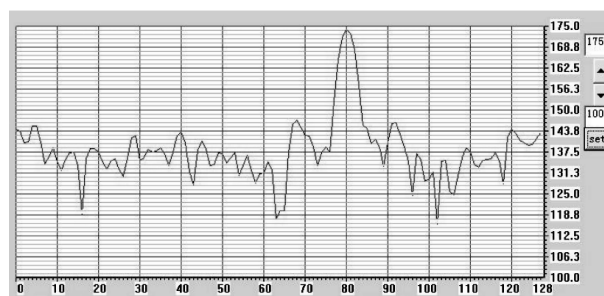


图 7 补偿后成像结果

Fig.7 Range profile after compensation

5 结束语

频率步进雷达信号是高分辨率雷达信号的一种重要形式,但对各频点间的相位变化十分敏感。随着信号载频频率的提高使得频率源各跳频点间的相

参性调试难度大、周期长。本文提出在信号处理机上进行相位补偿的方法,经过仿真和试验验证证实了其可行性和正确性。该方法可以在保证雷达系统性能的同时,有效降低硬件设计调试的难度,缩短调试周期。

参考文献:

- [1] 毛二可,龙腾,韩秋月. 频率步进雷达数字信号处理[J].航空学报,2001,22(6):16-25.
MAO Er-ke, LONG Teng, HAN Qiu-yue. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2001, 22(6): 16-25. (in Chinese)
- [2] 龙腾,李昉,吴琼之. 频率步进雷达参数设计与目标抽取算法[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(6): 26-31.
LONG Teng, LI Dan, WU Qiong-zhi. Design methods for step frequency waveform and the target pick-up algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(6): 26-31. (in Chinese)
- [3] 贺志毅. 合成宽带毫米波导引头的理论及实现[D]. 北京: 航天二院, 2002.
HE Zhi-yi. The theory studies and realization of synthetic wideband on millimeter-wave seeker [D]. Beijing: The Second Academy of China Aerospace, 2002. (in Chinese)
- [4] 苏宏艳,朱淮城. 毫米波宽带雷达相位误差校正方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(2): 253-256.
SU Hong-yan, ZHU Huai-cheng. Study on phase error calibration method for stepped frequency radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(2): 253-256. (in Chinese)

作者简介:

毕波(1978-),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为毫米波雷达系统总体;

BI Bo was born in Dalian, Laoning Province, in 1978. He is currently working toward the M.S. degree. His research direction is MMW radar system.

Email: dlbito@263.net

张永杰(1980-),男,安徽阜阳人,博士研究生,主要研究方向为毫米波雷达系统总体;

ZHANG Yong-jie was born in Fuyang, Anhui Province, in 1980. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research direction is MMW radar system.

李民(1985-),男,山东胶南人,博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理;

LI Min was born in Jiaonan, Shandong Province, in 1985. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research direction is radar signal processing.

朱淮城(1945-),男,江苏淮安人,研究员,主要研究方向为毫米波雷达系统总体。

ZHU Huai-cheng was born in Huai'an, Jiangsu Province, in 1945. He is now senior engineer of professor. His research direction is MMW radar system.