

# 基于雷达多通道接收机的合成方法研究

尹方始, 朱 力

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210013)

**摘要:** 在子带脉冲压缩方法的基础上, 对多通道幅相误差对合成图像质量指标的影响进行了详细分析, 发现子带脉冲压缩方法对通道间的不一致相位误差不敏感, 幅度误差是造成图像的峰值旁瓣比和积分旁瓣比指标恶化的关键因素, 因此需要对通道间的不一致幅度误差进行补偿。

**关键词:** 多通道; 频带分割; 合成带宽; 幅相误差

中图分类号: TN911.7; TN957

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)11-0070-04

## Research on the synthesis methods of wideband signal based on the multi-channel receiver of radar

YIN Fang Shi, ZHU Li

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210015, China)

**Abstract:** In this paper, synthesis method with subband pulse compression is studied and the emphasis of the article is on the analysis of the influences of channels' amplitude and phase errors on image performance indexes. The statistical simulation result shows that the phase errors between channels have low effects on this method, and the amplitude errors are the main factors of the losses of the ratio of peak value side lobe and the ratio of integral side lobe of images. So the compensation of the channels' amplitude errors is necessary.

**Key words:** multi-channel; intersection of spectrum; synthetic bandwidth; amplitude and phase error

分辨率是衡量合成孔径雷达的一个重要指标, 分辨率的提高能获得更多信息, 可极大地提高目标的识别能力。距离向分辨率的提高有赖于发射信号带宽的提高, 要得到 0.1 m 的斜距分辨率, 发射信号需具有 1.5 GHz 的带宽。而设计直接处理这种宽带信号的接收机比较困难, 因此利用多通道接收机并行接收宽带信号的方法得到重视。该方法将宽带信号进行频带分割, 用多个通道对子带信号分别同时接收, 然后合成宽带信号<sup>[1]</sup>。本文研究了先进行子带脉冲压缩<sup>[2]</sup>, 再合成宽带信号的方法(子带脉冲压缩法), 并与常用的先合成宽带信号, 再进行脉冲压缩的方法(传统合成方法)进行了比较, 对通道间不一致幅相误差对图像质量指标的影响进行了仿真和分析。

### 1 多通道接收机

多通道接收机的结构如图 1 所示。宽带信号经天线接收后, 首先用带通滤波器组实现频带分割得到一组窄带信号, 并将其分别进入相应通道与对应的本征相混频

到中频, 经采样变为数字信号, 最后进入信号处理机等待频率合成。其中每个通道的本征频率与该通道的带通滤波器的中心频率相对应。采用多通道接收机能降低对接收机带宽和采样率的要求, 同时多通道并行结构的使用有助于实现实时处理。

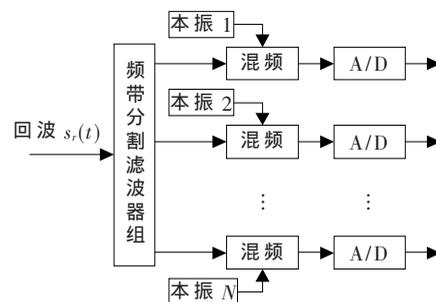


图 1 多通道接收机结构示意图

### 2 多通道合成技术

#### 2.1 传统合成方法

多通道信号的合成, 传统的方法如图 2 所示。对进

## 技术与方法 Technique and Method

入信号处理机的子带信号分别进行插值、频移,合成为宽带信号后进行脉冲压缩实现高分辨率。这种方法处理过程相对简单,但实际的频带分割滤波器过渡带不理想,使滤出的通道间数据相互影响,不利于信号合成<sup>[3]</sup>。所以合成成功的关键因素是能有效隔离不同频带并消除相邻通道影响的带通滤波器组。

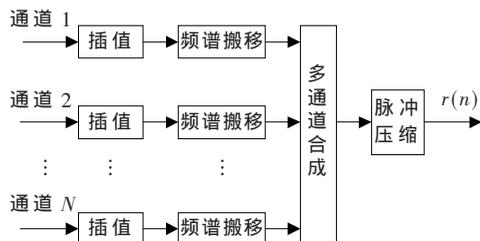


图2 传统合成法示意图

## 2.2 子带脉冲压缩法

子带脉中压缩方法要求子带信号在插值前先进行子带脉冲压缩。另外,通过发射信号定标链路,使发射宽带信号通过定向耦合器进入多通道并行接收机,记录下采样后的数据,作为各通道子带脉冲压缩的参考函数。水鹏朗等人<sup>[1]</sup>经过分析得出该方法对带通滤波器的要求较低,并对带通滤波器和插值滤波器的选择对合成图像性能的影响进行了详细分析。本文对这种方法存在多通道幅相误差时,合成图像质量指标所受的影响进行分析。

令  $s_r(t)$ 、 $s_{ref}(t)$  分别为宽带接收信号和参考信号,傅里叶变换分别为  $S_r(\omega)$ 、 $S_{ref}(\omega)$ ,发射信号中心频率为  $\omega_c$ ,带宽为  $B$ ,用于频带分割的带通滤波器组:

$$H_k(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega - \omega_{ok}| \leq \Delta\omega/2 \\ 0, & |\omega - \omega_{ok}| > \Delta\omega/2 \end{cases} \quad k=1, \dots, N$$

$N$  为滤波器的数目,  $\Delta\omega$  为滤波器带宽,  $\omega_{ok}$  为第  $k$  个滤波器的中心频率,满足:

$$\omega_{ok} = \omega_c + \left(k - \frac{1}{2} - \frac{N}{2}\right) \Delta\omega \quad (1)$$

$$S_r(\omega) = \sum_{k=1}^N S_{r,k}(\omega) H_k(\omega), S_{ref}(\omega) = \sum_{k=1}^N S_{ref,k}(\omega) H_k(\omega) \quad (2)$$

$S_{r,k}(\omega) H_k(\omega)$ 、 $S_{ref,k}(\omega) H_k(\omega)$  分别表示经第  $k$  个带通滤波器滤波后得到的子带接收信号和子带参考信号。

$$\text{因此 } R(\omega) = S_r(\omega) S_{ref}^*(\omega) = \sum_{k=1}^N [S_{r,k}(\omega) H_k(\omega)] [S_{ref,k}(\omega) H_k(\omega)]^* \quad (3)$$

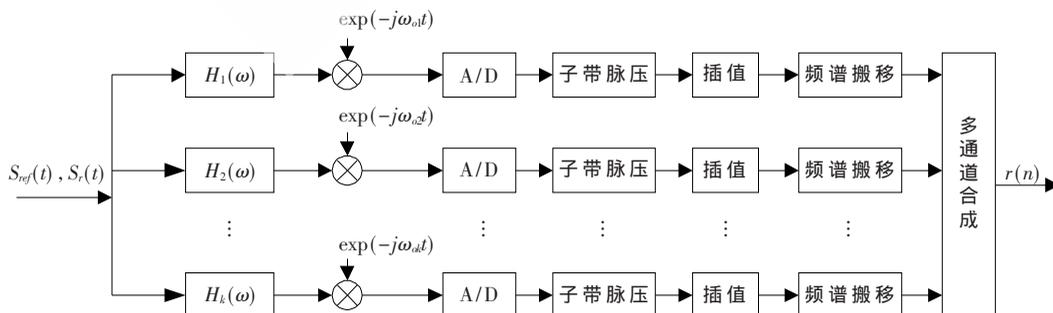


图3 子带脉冲压缩法示意图

$R(\omega)$  表示宽带接收信号和宽带参考信号的互相关函数

$r(\tau) = \int s_r(t) s_{ref}^*(t+\tau) dt$  的 Fourier 变换。

令  $s_{r,k}(t)$ 、 $s_{ref,k}(t)$  分别表示混频后得到的零中频子带接收信号和参考信号,其 Fourier 变换  $S_{r,k}(\omega)$ 、 $S_{ref,k}(\omega)$  满足:

$$S_{r,k}(\omega) = S_r(\omega + \omega_{ok}) H_k(\omega + \omega_{ok}), S_{ref,k}(\omega) = S_{ref}(\omega + \omega_{ok}) H_k(\omega + \omega_{ok}) \quad (4)$$

因此,式(3)可变为

$$R(\omega) = \sum_{k=1}^N S_{r,k}(\omega - \omega_{ok}) \times S_{ref,k}^*(\omega - \omega_{ok}) \quad (5)$$

$$r(\tau) = \sum_{k=1}^N r_k(\tau) \exp(j\omega_{ok}\tau) \quad (6)$$

其中  $r_k(\tau) = \int s_{r,k}(t) s_{ref,k}^*(t+\tau) dt$  表示零中频子带接收信号和参考信号的互相关输出,从而

$$|r(\tau)| = \left| \exp(j\omega_c\tau) \times \sum_{k=1}^N r_k(\tau) \exp(j(\omega_{ok} - \omega_c)\tau) \right| = \left| \sum_{k=1}^N r_k(\tau) \exp(j(\omega_{ok} - \omega_c)\tau) \right| \quad (7)$$

因此,对子带脉冲压缩后的信号经过插值、频移和叠加,就可以得到高分辨率信号。图3所示为子带脉冲压缩法的示意图。

## 3 通道幅相误差对合成效果影响的仿真与分析

在实际的雷达多通道接收机中,通道之间存在着不一致的幅度误差和相位误差<sup>[4]</sup>。当这些误差足够大时就会影响信号的合成效果,导致合成后图像的峰值旁瓣比和积分旁瓣比指标恶化,甚至导致合成失败。首先对存在通道幅相误差时的输出信号进行推导。

令  $S_{o1}(\omega)$ 、 $S_{o2}(\omega)$  分别表示理想情况下传统合成法和子带脉冲压缩法输出信号的傅里叶变换,则满足:

$$S_{o1}(\omega) = S_r(\omega + \omega_c) S_{ref}^*(\omega + \omega_c) \sum_{k=1}^N H_k(\omega + \omega_c) \quad (8)$$

$$S_{o2}(\omega) = S_r(\omega + \omega_c) S_{ref}^*(\omega + \omega_c) \sum_{k=1}^N |H_k(\omega + \omega_c)|^2 \quad (9)$$

从式(8)、式(9)可以看出,当滤波器为理想滤波器,即通带内幅频特性为矩形,并且相邻滤波器之间无重叠

# 技术与方法 Technique and Method

时,两种合成方法得到的结果基本一致。

当通道间存在幅相误差时,两种合成法输出信号的傅里叶变换为:

$$S'_{o1}(\omega) = S_r(\omega + \omega_c) S_{ref}^*(\omega + \omega_c) \sum_{k=1}^N (1 + \Delta A_k) H_k(\omega + \omega_c) \exp(j\Delta\varphi_k) \quad (10)$$

$$S'_{o2}(\omega) = S_r(\omega + \omega_c) S_{ref}^*(\omega + \omega_c) \sum_{k=1}^N (1 + \Delta A_k)^2 |H_k(\omega + \omega_c)|^2 \quad (11)$$

其中  $\Delta A_k$  代表第  $k$  通道的相对幅度误差,幅度误差服从均值为 0、标准差为 1 dB 的随机正态分布,  $\Delta\varphi_k$  为第  $k$  通道的相位误差,相位误差服从均值为 0,标准差为  $10^\circ$  的随机正态分布。 $\sigma_{\Delta A}$ 、 $\sigma_{\Delta\varphi}$  分别表示幅度误差和相位误差的标准差,  $\sigma_{\Delta A_{dB}}$  表示幅度误差的标准差对应的的分贝值,满足  $\sigma_{\Delta A_{dB}} = 20 \log_{10}(1 + \sigma_{\Delta A})$ 。

从式(10)、式(11)可以看出,通道间的幅度和相位误差对传统合成法得到的合成信号都有影响,而子带脉冲压缩法得到的合成信号对相位误差不敏感,另外幅度误差对两种方法的影响程度不一样。本文通过仿真及统计的方法对此进行了详细分析,同时为了降低图像的旁瓣,脉冲压缩时采用 hamming 窗加权。参数设定宽带信号为 LFM 信号,信号带宽为 1.5 GHz,带通滤波器带宽为 300 MHz,相邻滤波器中心频率间隔为 300 MHz,滤波器数目为 5, A/D 采样率为 600 MHz,点目标斜距为 30 km。

### 仿真 1 理想情况

图 4 所示为理想情况下两种方法得到的合成信号与宽带信号直接脉冲压缩后的性能指标的比较。两种合成方法得到的压缩波形性能相近,主瓣宽度与宽带信号压缩波形的主瓣宽度一致,旁瓣都低于 -40 dB,与理论分析相符合。具体指标如表 1 所示。

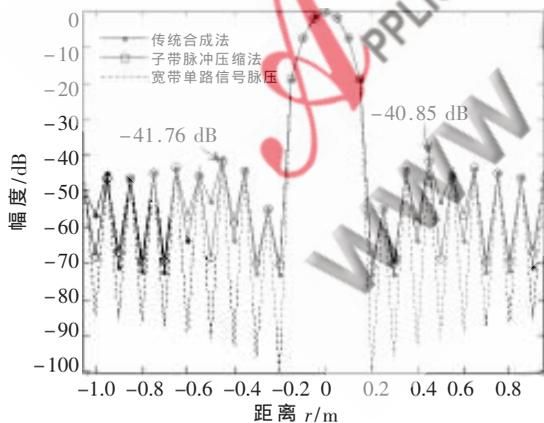


图 4 理想情况下信号合成结果

表 1 理想情况下压缩波形输出主要性能指标

|          | 主瓣 3 dB 宽度/m | 峰值旁瓣比 (PLSR)/dB | 积分旁瓣比 (ILSR)/dB |
|----------|--------------|-----------------|-----------------|
| 宽带单路信号脉压 | 0.122        | -42.68          | -34.5231        |
| 传统合成法    | 0.122        | -40.85          | -34.1603        |
| 子带脉冲压缩法  | 0.122        | -41.47          | -34.6532        |

### 仿真 2 存在通道间幅相误差的情况

在每个通道内加入幅相误差,并分成只加入幅度误差、只加入相位误差以及幅度和相位误差并存的三种情况,将宽带单路信号直接脉冲压缩的结果作为参考。

图 5 所示为幅度误差使两种方法得到的点目标压缩波形的旁瓣都抬高的结果。图 6 所示为相位误差使传统合成法得到的压缩波形旁瓣抬高的结果,主瓣两侧波形不对称,而子带脉冲压缩法受影响小。当幅相误差同时作用时,两种方法的压缩波形旁瓣都抬高了,且其电平都高于仅存在相同的幅度或相位误差时的情况,不同之处是子带脉冲压缩法的图像主瓣两侧波形对称,而传统合成方法的图像的主瓣两侧波形不对称,如图 7 所示。

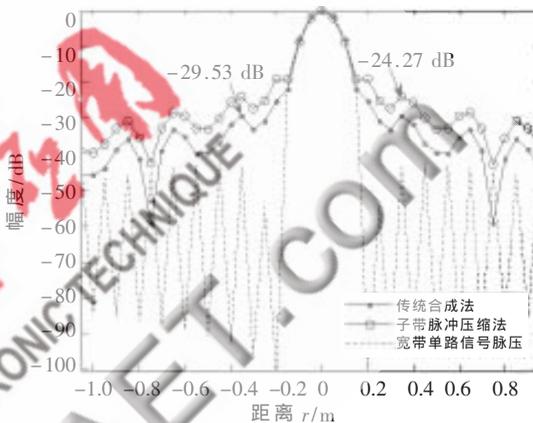


图 5 只加幅度误差时信号合成结果

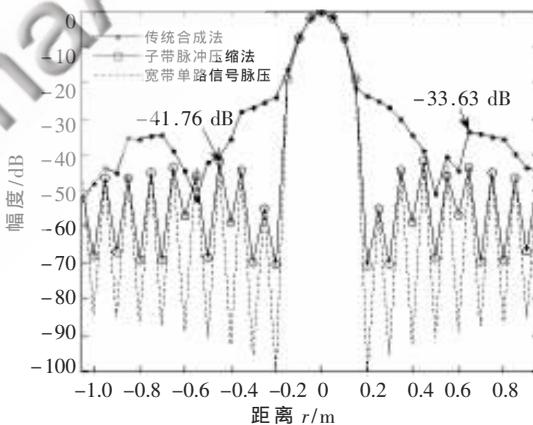


图 6 只加相位误差时信号合成结果

对目标进行 50 次仿真,并将合成后图像的两个质量指标——峰值旁瓣比(PLSR)和积分旁瓣比(ISLR)进行了统计,结果如图 8 所示(其中‘·’为传统合成法,‘o’为子带脉冲压缩法)。幅度误差对子带脉冲压缩法的影响更严重,而相位误差对传统合成法有较大影响,当两种误差共同作用时,两种方法得到图像的 PLSR 和 ISLR 指标都受到了较大的恶化。通过对样本的数理统计可知,当幅度误差的标准差为 1 dB、相位误差的标准差为  $10^\circ$  时,峰值旁瓣比指标的恶化程度均值约 15 dB、波动约 5 dB,积分旁瓣比指标的恶化程度均值约 13 dB、波动约 4 dB。

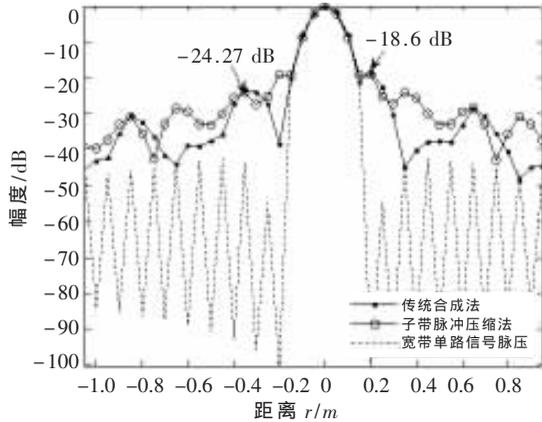


图7 加幅相误差时信号合成结果

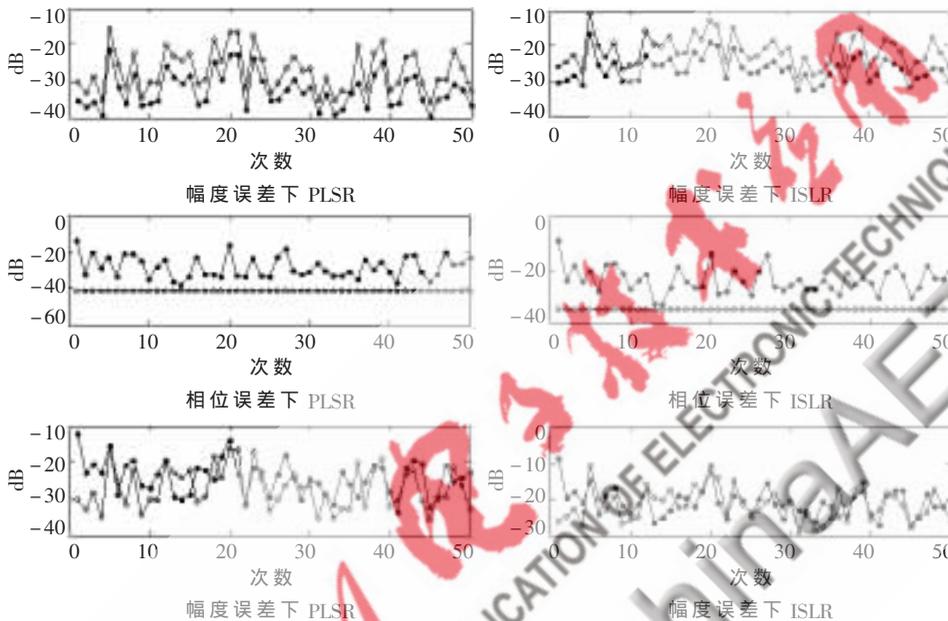


图8 通道随机误差下合成信号压缩波形的PLSR和ISLR比较  
(其中“·”为传统合成法,“o”为子带脉冲压缩法)

(1)传统合成法:幅度误差下 PLSR(-32.3,4.777), ISLR(-26.63,3.52);相位误差下 PLSR(-28.06,6.005),

ISLR(-23.68,4.818);幅相误差下 PLSR(-24.14,4.755), ISLR(-20.88,3.855)。

(2)子带脉冲压缩法:幅相误差下 PLSR(-27.11,5.661), ISLR(-21.56,4.343)。其中(X,Y)中的X代表样本均值,Y代表样本标准差,单位均为dB。

本文研究了基于多通道接收机的子带脉冲压缩合成法,对通道间不一致幅相误差对合成后图像质量指标的影响进行了仿真和分析,并与传统的合成方法进行了比较。仿真结果表明当通道间存在幅相误差时,传统合成法需要对幅度和相位误差进行补偿,而子带脉冲压缩法对相位误差不敏感,幅度误差是导致其合成图像质量指标恶化的主要原因,因此应该对通道间的幅度误差进行补偿。

参考文献

- [1] 陈隽永,徐继麟.超宽带雷达多通道接收机技术[J].无线电工程增刊,2001:60-61.
  - [2] 水鹏朗,保铮.基于频带分割的超宽带雷达脉冲压缩方法[J].电子学报,1999,27(6):50-53.
  - [3] 陈隽永,徐继麟.超宽带雷达频带分割滤波器设计[J].系统工程与电子技术,2001,23(2):1-3.
  - [4] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,2001.
- (收稿日期:2009-11-06)

作者简介:

尹方始,女,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:宽带相控阵SAR系统。

朱力,男,1964年生,研究员,主要研究方向:星载SAR总体设计。