

分布式相参雷达LFM宽带去斜参数估计方法

周宝亮*

(北京无线电测量研究所 北京 100039)

摘 要: 宽带分布式相参雷达技术能够有效提升目标测量精度和识别性能, 具有重要的研究价值。针对现有雷达装备一般不具有同时对正负调频率宽带线性调频信号进行去斜处理的能力, 即在接收相参合成阶段无法通过正负调频率宽带去斜方式获取宽带信号发射相参所需延时相位值的问题, 该文利用单元雷达与目标之间存在延时差, 将单元雷达发射的宽带线性调频信号等效为目标信号, 对接收信号进行互相关处理获取发射相参合成所需的参数值, 通过建模和仿真实现接收相参和发射相参合成处理, 并对飞机目标进行1发2收相参探测试验, 获得了理想的试验结果。该方法具有估计精度高、运算量小和实时性好的优势, 可应用于分布式相参雷达工程实现。

关键词: 相参雷达; 分布式; LFM宽带去斜; 参数估计

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1566-07

DOI: 10.11999/JEIT190398

Distributed Coherent Radar LFM Wideband Stretch Parameter Estimation Method

ZHOU Baoliang

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100039, China)

Abstract: Wideband distributed coherent radar technology can effectively improve the target measurement accuracy and recognition performance, and has important research value. For the existing radar equipment generally does not have the ability to stretch the positive and negative frequency modulation rate wideband LFM signal simultaneously, that is the problem that the delay phase value of wideband signal transmit coherent can not be obtained by wideband stretch method in receive coherent synthesis phase. This article uses the delay difference between the unit radar and the target, equivalents the unit radar transmitting wideband LFM signal to the target signal, performs cross-correlation processing on the received signal to obtain the value of transmit coherent parameter. Through modeling and simulation receiving coherent and transmitting coherent synthesis processing are realized, and the two input single output coherent detection test of the aircraft target is carried out, and the ideal test results are obtained. The method has the advantages of high estimation accuracy, small calculation amount and good real-time performance, can be applied to distributed coherent radar engineering implementation.

Key words: Coherent radar; Distributed; LFM wideband stretch; Parameter estimation

1 引言

分布式相参雷达为了获取相参合成参数, 起始阶段, 单元雷达之间发射相互正交的波形, 单元雷达不仅接收自己发射的信号同时也接收其它单元雷达发射的信号, 对接收到的所有回波信号进行相参合成处理, 获得 N^2 倍信噪比增益改善(N 为单元雷达个数), 此阶段称为接收相参合成; 在接收相参合成的基础上, 当延时相位参数估计精度满足要求时, 单元雷达之间发射相同波形, 通过控制和调整

单元雷达发射信号的延时和相位, 实现电磁波信号空间能量合成, 即发射相参合成, 同时在接收端对回波信号进行接收相参合成, 获得 N^3 倍信噪比增益改善, 此阶段称为收发全相参合成。接收相参合成主要用于获取发射相参合成起始所需的延时和相位值, 是一个短暂的过渡过程, 进而转入稳态过程——收发全相参合成阶段, 达到对信号能量的最大化利用, 最大程度提升雷达系统探测威力和测量精度^[1-17]。相比于窄带信号, 宽带信号具有更高的距离分辨率, 能够有效提升目标测量精度和识别性能^[18,19]。将分布式相参雷达技术优势和宽带信号探测优势相结合, 具有重要的理论研究和应用价值。

收稿日期: 2019-06-03; 改回日期: 2019-09-15; 网络出版: 2020-02-01

*通信作者: 周宝亮 zbluestc@126.com

线性调频信号宽带去斜无论对现有雷达装备还是分布式相参雷达都是比较理想的处理方式, 具有硬件要求低、运算量小、实时性好等优势。但对于分布式相参雷达, 起始阶段, 需要通过发射正交波形获取发射相参合成参数, 线性调频信号正交一般采用正负调频率的方式实现, 现有单元雷达一般不具有同时对正负调频率宽带线性调频信号进行去斜处理的能力, 即在接收相参合成阶段无法通过正负调频率宽带去斜方式获取宽带信号发射相参所需的延时相位值。此外, 窄带信号参数估计精度不能满足宽带信号发射相参合成精度要求。针对上述问题, 本文提出了一种线性调频信号宽带去斜参数估计方法, 该方法核心思想是将单元雷达发射的宽带线性调频信号等效为目标信号, 通过对接收信号相参合成处理获得发射相参合成所需的参数值。

本文首先根据不同应用模式建立1发多收和多发多收信号模型, 然后针对应用模式分别给出参数估计方法; 最后通过仿真和实测数据分析, 验证了宽带去斜参数估计方法的正确性和有效性。

2 信号模型

2.1 1发多收模式

如图1所示为分布式相参雷达1发多收模式, 其中一部单元雷达既发射信号又接收回波信号, 其它单元雷达仅接收回波信号, 单元雷达个数为 N , 与目标距离分别为 $\{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ 。

单元雷达发射宽带线性调频信号(LFM)表达式为

$$S_t(t_p) = \text{rect}\left(\frac{t_p}{T_p}\right) \exp\{j2\pi f_c t_p + j\pi k_r t_p^2\} \quad (1)$$

式中, T_p 为发射信号脉冲宽度, f_c 为发射信号载频, k_r 为线性调频率, t_p 为脉冲发射时间, $\text{rect}\left(\frac{t_p}{T_p}\right)$ 为宽度为 T_p 的矩形窗函数。

经目标反射后, 单元雷达对回波信号进行去斜处理, 得到

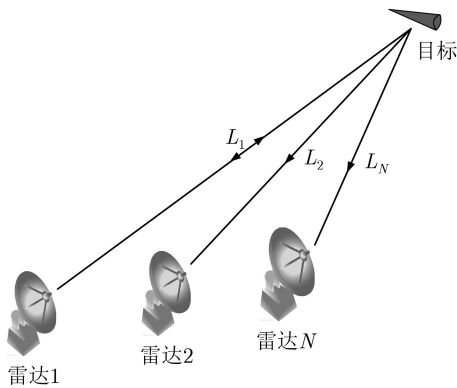


图1 分布式相参雷达1发多收模式

$$S_{sn}(t_p) = \text{rect}\left(\frac{t_p - \frac{L_n}{c} - \frac{L_1}{c}}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{-j2\pi k_r \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right) t_p - j2\pi f_c \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right) + j\pi k_r \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right)^2\right\} \quad (2)$$

式中, $n = 1, 2, \dots, N$ 。回波信号频率 $f_{sn} = -k_r \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right)$, 相位 $\phi_{sn} = -2\pi f_c \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right) + \pi k_r \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right)^2$ 。

2.2 多发多收模式

如图2所示为分布式相参雷达多发多收模式, 每部单元雷达既发射信号又接收回波信号。

由于单元雷达之间发射信号为相干信号, 在空间合成后为一路信号, 合成信号 $S_{syn}(t_p)$ 表达式为

$$S_{syn}(t_p) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{t_p - \frac{L_n}{c}}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi f_c \left(t_p - \frac{L_n}{c}\right) + j\pi k_r \left(t_p - \frac{L_n}{c}\right)^2\right\} \quad (3)$$

以单元雷达1为例进行分析, 对回波信号进行去斜处理, 得到

$$S_{s1}(t_p) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{t_p - \frac{L_n}{c} - \frac{L_1}{c}}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{-j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right) + j\pi k_r \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right)^2 - j2\pi f_c \frac{L_n}{c} - j2\pi f_c \frac{L_1}{c}\right\} \quad (4)$$

回波信号频率为 $f_{s1} = \sum_{n=1}^N \left(-k_r \left(\frac{L_n}{c} + \frac{L_1}{c}\right)\right)$ 。

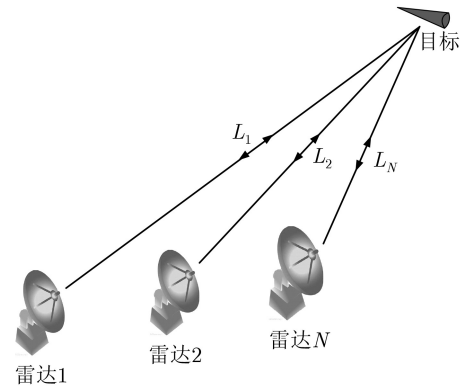


图2 分布式相参雷达多发多收模式

通过分析公式,可以把单元雷达等效成多个目标或1个目标的多个散射点,发射电磁波空间合成等效为多目标(多散射点)反射回波信号的相互叠加。

3 参数估计方法

宽带信号参数估计面临多散射点问题,互相关算法可以巧妙回避散射点关联问题,通过互相关算法能够精确获得单元雷达之间延时和相位数值。不失一般性,以2单元雷达为例进行分析。

3.1 1发多收模式

对单元雷达接收回波信号进行互相关处理,表达式为

$$S_{\text{corr}}(t_p) = S_{s1}(t_p) \cdot S_{s2}^*(t_p) \\ = \exp \left\{ j2\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) t_p + j2\pi f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - j\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

要实现单元雷达1和单元雷达2回波信号相参合成,需将两路回波信号延时和相位进行对齐,单元雷达1与单元雷达2延时差为 $\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c}$,相位差为 $2\pi f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) + \pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - \pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2$ 。通过分析可以发现,互相关得到的延时和相位值可以直接用于单元雷达接收回波信号的相参合成。

3.2 多发多收模式

3.2.1 发射相参合成

对单元雷达接收回波信号进行互相关处理,表达式为

$$S_{\text{corr}}(t_p) = \exp \left\{ j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) + j\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 \right. \\ \left. - j\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_2}{c} \right)^2 + j2\pi f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right\} + 1 \\ + \exp \left\{ j4\pi k_r t_p \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) + j4\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} \right)^2 \right. \\ \left. - j4\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} \right)^2 + j4\pi f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right\} \\ + \exp \left\{ j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - j\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_2}{c} \right)^2 \right. \\ \left. + j2\pi f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right\} \quad (6)$$

频率 $k_r \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right)$ 对应的信号表达式为

$$S_{\text{corr}2} = 2 \cos \left(\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c} \right)^2 \right) \\ \cdot \exp \left\{ j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right. \\ \left. + j2\pi f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right. \\ \left. + j2\pi k_r \left(\left(\frac{L_1}{c} \right)^2 - \left(\frac{L_2}{c} \right)^2 \right) \right\} \quad (7)$$

要实现发射信号在目标处电磁波能量合成,需对单元雷达发射电磁波信号进行延时和相位控制,使得发射信号在目标处进行同时同相叠加。以单元雷达1为基准,控制单元雷达2发射信号延时,延时控制量为 $\Delta t = \frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c}$,即

$$S_{t2}(t_p) = \text{rect} \left(\frac{t_p - \frac{L_2}{c} - \Delta t}{T_p} \right) \\ \cdot \exp \left\{ j2\pi f_c \left(t_p - \frac{L_2}{c} - \Delta t \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(t_p - \frac{L_2}{c} - \Delta t \right)^2 \right\} \quad (8)$$

通过对单元雷达接收回波信号进行互相关处理得到的延时值可直接用于发射信号延时控制。

3.2.2 接收相参合成

首先对单元雷达接收回波信号特征进行分析,单元雷达1和单元雷达2去斜后回波信号表达式分别为

$$S_{s1}(t_p) = \exp \left\{ -j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - j2\pi f_c \frac{L_1}{c} - j2\pi f_c \frac{L_1}{c} \right\} \\ + \exp \left\{ -j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_1}{c} \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - j2\pi f_c \frac{L_2}{c} - j2\pi f_c \frac{L_1}{c} \right\} \quad (9)$$

$$S_{s2}(t_p) = \exp \left\{ -j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_2}{c} \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_2}{c} \right)^2 - j2\pi f_c \frac{L_1}{c} - j2\pi f_c \frac{L_2}{c} \right\} \\ + \exp \left\{ -j2\pi k_r t_p \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_2}{c} \right) \right. \\ \left. + j\pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_2}{c} \right)^2 - j2\pi f_c \frac{L_2}{c} - j2\pi f_c \frac{L_2}{c} \right\} \quad (10)$$

单元雷达去斜结果如图3所示,图3(a)目标为

单散射点目标, 通过图形可以发现, 由于单元雷达之间与目标存在距离差, 经目标反射后, 在每个单元雷达上呈现为两个目标, 针对多散射点情况, 距离差足够大的情况下, 也会呈现出两个散射点不交叠的目标, 如图3(b)所示为飞机目标多散射点宽带实测数据去斜结果。

通过上述分析可以发现, 同一个目标被2部雷达接收后形成4个去斜峰值点, 为了便于分析, 将单元雷达1接收单元雷达1发射信号峰值点定义为 S_{11} , 单元雷达1接收单元雷达2发射信号峰值点定义为 S_{12} , 单元雷达2接收单元雷达1发射信号峰值点定义为 S_{21} , 单元雷达2接收单元雷达2发射信号峰值点定义为 S_{22} 。 S_{11} 与 S_{12} , S_{21} 和 S_{22} 的延时差分别为 $\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c}$, $\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c}$ 和 $2\left(\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c}\right)$, 该延时差可以通过单元雷达之间对回波信号进行互相关处理得到。

S_{11} 与 S_{12} 的相位差为

$$\begin{aligned} \phi_{11} - \phi_{12} = & \pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - \pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 \\ & + 2\pi f_c \frac{L_2}{c} - 2\pi f_c \frac{L_1}{c} \end{aligned} \quad (11)$$

S_{11} 与 S_{21} 的相位差为

$$\begin{aligned} \phi_{11} - \phi_{21} = & \pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - \pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_2}{c} \right)^2 \\ & + 2\pi f_c \frac{L_2}{c} - 2\pi f_c \frac{L_1}{c} \end{aligned} \quad (12)$$

S_{11} 与 S_{22} 的相位差为

$$\begin{aligned} \phi_{11} - \phi_{22} = & \pi k_r \left(\frac{L_1}{c} + \frac{L_1}{c} \right)^2 - \pi k_r \left(\frac{L_2}{c} + \frac{L_2}{c} \right)^2 \\ & + 4\pi f_c \frac{L_2}{c} - 4\pi f_c \frac{L_1}{c} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\phi_{11} - \phi_{12} = \phi_{11} - \phi_{21} \neq \phi_{11} - \phi_{22} \text{ 与 } \phi_{\text{corr}2} = 2\pi$$

$f_c \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) + 2\pi k_r \left(\left(\frac{L_1}{c} \right)^2 - \left(\frac{L_2}{c} \right)^2 \right)$ 进行比较发现 $\phi_{11} - \phi_{22} = 2\phi_{\text{corr}2}$, 接下来分析一下 $\phi_{11} - \phi_{12}$ 与 $\phi_{\text{corr}2}$ 之间的相位差

$$(\phi_{11} - \phi_{12}) - \phi_{\text{corr}2} = \pi k_r \left(\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c} \right)^2 \quad (14)$$

$\phi_{11} - \phi_{12}$ 与 $\phi_{\text{corr}2}$ 之间的相位差与 k_r 和延时差 $\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c}$ 有关, 当 $\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c} \right)^2 \leq \frac{\pi}{5}$ 时, 可以直接利用式(7)互相关得到的相位值进行 S_{11} , S_{12} , S_{21} 和 S_{22} 的接收相参合成; 但当 $\pi k_r \left(\frac{L_1}{c} - \frac{L_2}{c} \right)^2 > \frac{\pi}{5}$ 时, 利用互相关得到的相位值进行接收相参合成会导致相参合成增益损失。为了在实际应用中降低相位差对相参合成的影响, 同时考虑雷达系统自身误差影响, 实现 S_{11} , S_{12} , S_{21} 和 S_{22} 最大化能量合成, S_{11} 与 S_{12} , S_{21} 和 S_{22} 分别进行互相关处理, 利用互相关得到的延时和相位进行相参合成。

4 仿真分析

仿真参数如表1所示。

4.1 1发2收模式

1发2收模式时, 单元雷达1既发射信号又接收回波信号, 单元雷达2仅接收回波信号, 利用互相关处理得到的延时和相位值直接用于1发2收接收相参合成, 相参合成结果如图4所示, 单元雷达信号幅度分别为 1.602×10^5 和 2.031×10^5 , 相参合成后信号幅度为 3.632×10^5 , 接近理论合成增益改善。

文献[15]第3.3节研究了互相关方法延时相位估计的均方误差, 图5给出了信噪比为15 dB情况下互相关仿真结果, 通过仿真分析, 当信噪比大于15 dB时, 采用互相关方法能够准确获取延时相位参数值, 满足信号相参合成需求, 与文献[15]研究结论一致。

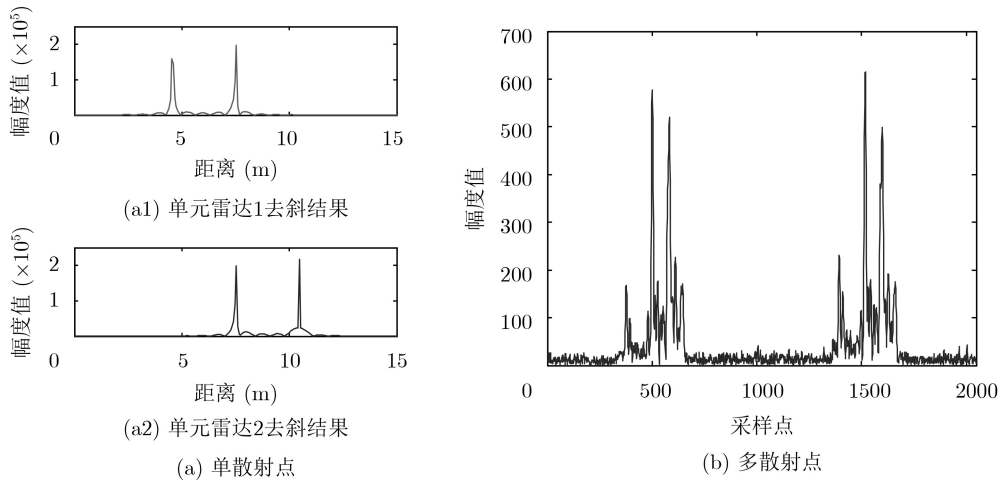


图3 单元雷达去斜结果

表 1 仿真参数

仿真名称	数值
雷达个数(部)	2
信号频率	X波段
信号带宽(GHz)	2
雷达1与目标距离(m)	4.6
雷达2与目标距离(m)	10.5

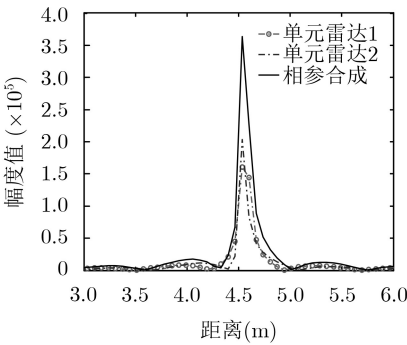


图 4 接收相参合成结果

4.2 2发2收模式

4.2.1 发射相参合成

由于2部雷达与目标存在距离差,回波信号去斜后均表现为2个目标的现象,如图6(a)所示。对去斜后信号进行互相关处理,仿真结果如图6(b)所示。

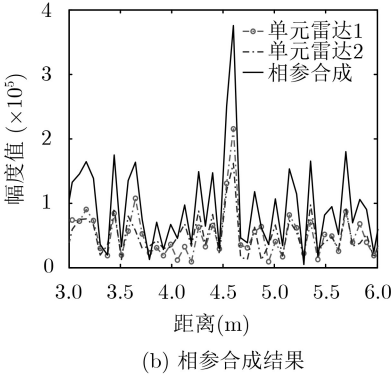
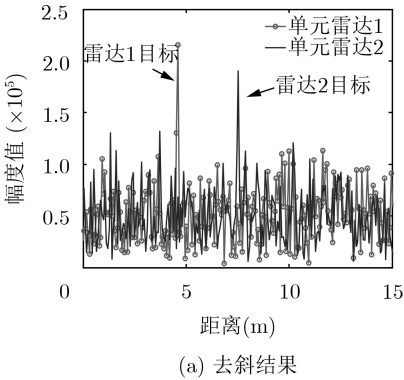


图 5 互相关仿真结果

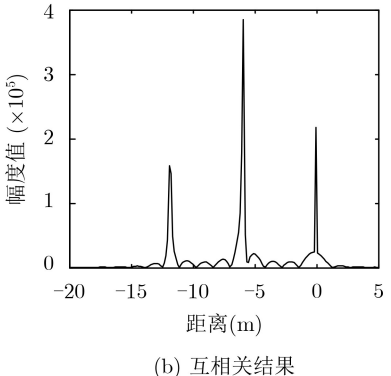
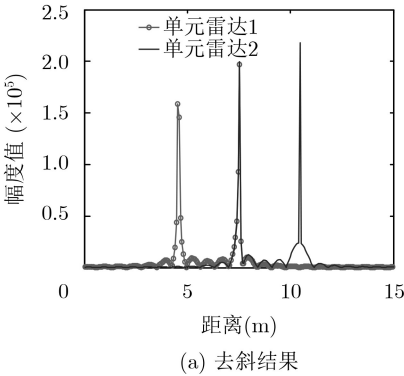


图 6 互相关仿真结果

示,通过图形可以发现互相关后的信号存在3个频率,分别为 $\left\{0, k_r \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right), 2k_r \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right) \right\}$,其中 $k_r \left(\frac{L_2}{c} - \frac{L_1}{c} \right)$ 信号能量最大,近似为其它信号能量的2倍,与理论推导一致。

将互相关估计的延时值用于发射信号延时控制,发射信号电磁波合成幅度如图7(a)所示,相参合成后信号去斜结果如图7(b)所示,相参合成信号幅度近似为单元雷达信号幅度的2倍。

4.2.2 接收相参合成

要将2单元雷达回波信号进行最大化能量合成,首先需要将 S_{11} , S_{12} , S_{21} 和 S_{22} 4路信号分离出来。 S_{11} 分别与 S_{12} , S_{21} 和 S_{22} 进行互相关处理,估计延时和相位差,接收相参合成结果如图8所示。

5 实测数据分析

利用2单元分布式相参合成试验系统对飞机目标进行1发2收相参探测试验,试验信号带宽为500 MHz。如图9所示为相参合成结果。选取飞机目标3个能量比较大的散射点进行分析,散射点1单元雷达幅度分别为1551和2427,合成后信号幅度为3947;散射点2单元雷达幅度分别为1096和2360,合成后信号幅度为3440;散射点3单元雷达幅度分别为1493和2035,合成后信号幅度为3528。通过飞

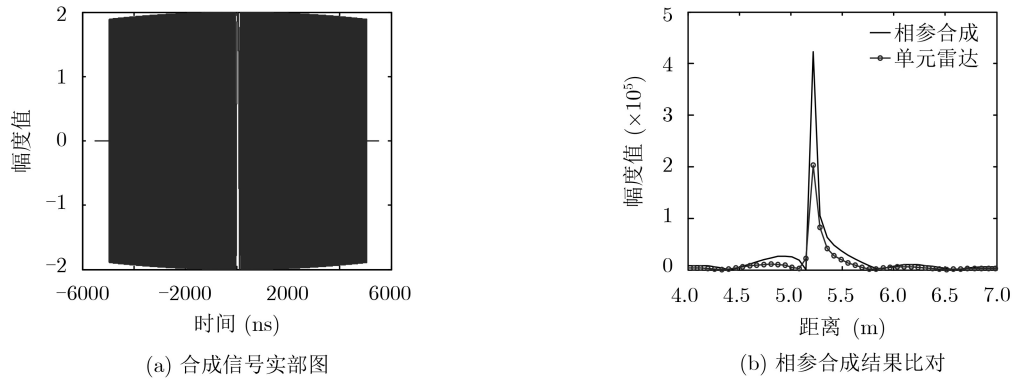


图7 发射信号相参合成结果

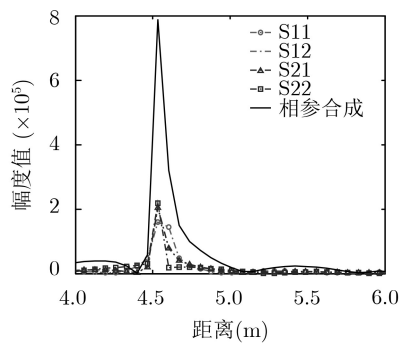


图8 接收相参合成结果

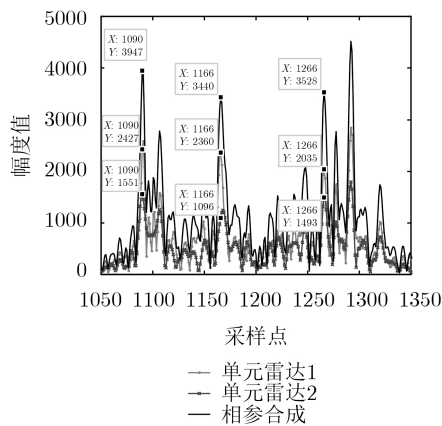


图9 相参合成信号幅度图

机目标试验数据分析, 采用LFM宽带去斜参数估计方法, 获得了理想的试验结果。

6 结束语

针对分布式相参雷达一发多收和多发多收典型探测模式, 本文给出了线性调频信号宽带去斜参数估计方法, 将单元雷达发射的宽带线性调频信号等效为目标信号, 通过对回波信号进行互相关处理, 获取接收相参合成和发射相参合成所需的参数。该方法解决了现有雷达无法通过正负调频率宽带去斜方式获取发射相参所需延时相位值的问题, 同时, 具有运算量小, 易于时实参数估计和工程实现的优点。

参考文献

- [1] CUOMO K M, COUTTS S D, MCHARG J C, *et al.* Wideband aperture coherence processing for next generation radar (NexGen)[R]. Report ESC-TR-2004-087, 2004.
- [2] COUTTS S, CUOMO K, MCHARG J, *et al.* Distributed coherent aperture measurements for next generation BMD radar[C]. The 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, USA, 2006: 390–393.
- [3] BROOKNER E. Phased-array and radar breakthroughs[C]. 2007 IEEE Radar Conference, Boston, USA, 2007: 37–42.
- [4] BROOKNER E. Phased-array and radar astounding breakthroughs—an update[C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720771](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720771).
- [5] National Research Council of the National Academies. Making sense of ballistic missile defense: An assessment of concepts and systems for U.S. boost-phase missile defense in comparison to other alternatives[R]. Washington: National Academies Press, 2012.
- [6] 鲁耀兵, 高红卫, 周宝亮. 分布式孔径相参合成雷达技术[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 55–64. doi: [10.12000/JR17014](https://doi.org/10.12000/JR17014).
LU Yaobing, GAO Hongwei, and ZHOU Baoliang. Distributed aperture coherence-synthetic radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 55–64. doi: [10.12000/JR17014](https://doi.org/10.12000/JR17014).
- [7] 周宝亮, 周东明, 高红卫, 等. 分布式孔径相参合成雷达联合天线增益分析[J]. 雷达学报, 2017, 6(4): 332–339. doi: [10.12000/JR17055](https://doi.org/10.12000/JR17055).
ZHOU Baoliang, ZHOU Dongming, GAO Hongwei, *et al.* Distributed aperture coherence-synthetic radar joint antenna gain analysis[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 332–339. doi: [10.12000/JR17055](https://doi.org/10.12000/JR17055).
- [8] 周宝亮, 高红卫, 文树梁, 等. 分布式相参雷达基线选择与标定误差分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2438–2443. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.08).
ZHOU Baoliang, GAO Hongwei, WEN Shuliang, *et al.* Distributed coherent radar baseline selection and calibration

- error analysis[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(11): 2438–2443. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.08).
- [9] 周宝亮, 雷子健, 周东明, 等. 分布式孔径相参雷达预警探测技术[J]. 信号处理, 2018, 34(11): 1330–1338. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.008](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.008).
- ZHOU Baoliang, LEI Zijian, ZHOU Dongming, *et al.* Early-warning detection technology of distributed aperture coherent radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(11): 1330–1338. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.008](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.008).
- [10] 周宝亮, 周东明, 高红卫, 等. 分布式孔径相参合成雷达系统设计与试验研究[J]. 现代防御技术, 2018, 46(3): 112–119. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.017).
- ZHOU Baoliang, ZHOU Dongming, GAO Hongwei, *et al.* Research on the distributed aperture coherence-synthetic radar system design and experiment[J]. *Modern Defence Technology*, 2018, 46(3): 112–119. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.017).
- [11] 李尚远, 肖雪迪, 郑小平. 基于微波光子学的分布式相参孔径雷达[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 178–188. doi: [10.12000/JR19024](https://doi.org/10.12000/JR19024).
- LI Shangyuan, XIAO Xuedi, and ZHENG Xiaoping. Distributed coherent aperture radar enabled by microwave photonics[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 178–188. doi: [10.12000/JR19024](https://doi.org/10.12000/JR19024).
- [12] GAO Hongwei, ZHOU Baoliang, ZHOU Dongming, *et al.* Performance analysis and experimental study on distributed aperture coherence-synthetic radar[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 343–347. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059191](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059191).
- [13] LONG Teng, ZHANG Honggang, ZENG Tao, *et al.* High accuracy unambiguous angle estimation using multi-scale combination in distributed coherent aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(7): 1090–1098. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0450](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0450).
- [14] ZENG Tao, YIN Pilei, and LIU Quanhua. Wideband distributed coherent aperture radar based on stepped frequency signal: theory and experimental results[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(4): 672–688. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0221](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0221).
- [15] SUN Peilin, TANG Jun, HE Qian, *et al.* Cramer–Rao bound of parameters estimation and coherence performance for next generation radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(5): 553–567. doi: [10.1049/iet-rsn.2012.0139](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2012.0139).
- [16] 宋靖, 周青松, 张剑云. 基于相关法的分布式全相参雷达相干参数估计及相参性能[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1710–1715. doi: [10.11999/JEIT141339](https://doi.org/10.11999/JEIT141339).
- SONG Jing, ZHOU Qingsong, and ZHANG Jianyun. Coherent parameters estimation by cross-correlation for distributed aperture fully coherent radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1710–1715. doi: [10.11999/JEIT141339](https://doi.org/10.11999/JEIT141339).
- [17] 刘兴华, 徐振海, 肖顺平. 分布式相参雷达几何布置约束条件[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(8): 1723–1731. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.08.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.08.09).
- LIU Xinghua, XU Zhenhai, and XIAO Shunping. Geometric arrangement constraints of distributed coherent aperture radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(8): 1723–1731. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.08.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.08.09).
- [18] 黄巍, 贺知明, 向敬成. 宽带雷达能量积累与信号检测方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 889–892. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2004.07.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2004.07.011).
- HUANG Wei, HE Zhiming, and XIANG Jingcheng. On detection methods of broadband radar signals[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(7): 889–892. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2004.07.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2004.07.011).
- [19] 李巍, 齐巍, 丁赤飏, 等. 基于分布式雷达的宽带脉冲三维测距机制及方法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 643–650. doi: [10.11999/JEIT140575](https://doi.org/10.11999/JEIT140575).
- LI Wei, QI Wei, DING Chibiao, *et al.* Research on mechanisms and methods in the 3D measurement with wide-band pulse based on distributed radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 643–650. doi: [10.11999/JEIT140575](https://doi.org/10.11999/JEIT140575).

周宝亮: 男, 1985年生, 高级工程师, 研究方向为分布式孔径相参合成雷达技术.

责任编辑: 陈 倩