

分布式全相参雷达系统时间与相位同步方案研究

曾涛 殷丕磊* 杨小鹏 范华剑

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘要: 分布式全相参雷达是一种新体制雷达,它解决了大口径雷达难以机动部署、造价昂贵等问题,是下一代雷达的发展方向,目前实现分布式全相参雷达所面临的关键技术问题是时间同步和相位同步。对此,该文分析了时间同步误差和相位同步误差的来源,建立了相应的数学模型,仿真了同步误差对相参性能的影响,给出了时间同步误差及相位同步误差的指标要求。并基于有线传输的非相关传输方式提出了时间同步方案,基于定标的方式提出了相位同步方案,以分别实现分布式全相参雷达的时间同步和相位同步。该文所提出的分布式全相参雷达同步方案,对于这一新体制雷达的实现具有一定的指导意义。

关键词: 分布式; 全相参; 同步; 定标

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)01-0105-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20104

Time and Phase Synchronization for Distributed Aperture Coherent Radar

Zeng Tao Yin Pi-lei Yang Xiao-peng Fan Hua-jian

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As a new radar technology, the distributed aperture coherent radar is expected to be the next generation radar, which is easier to transport and less expensive than the traditional large aperture radar. However, the time synchronization and phase synchronization are key issues to be addressed for the distributed aperture coherent radar. In this paper, the error sources of time synchronization and phase synchronization are analyzed, and the corresponding mathematical models are first derived. Then, the impact of synchronization errors on the coherent performance is simulated, and the accuracy of time and phase synchronization is presented based on the simulation results. Finally, the noncorrelation transmission scheme and the calibration scheme based on the wired transmission are proposed to realize the time and phase synchronization, respectively. Research of the synchronization problem could be very helpful to realize the new radar technology of distributed aperture coherent radar.

Key words: Distributed aperture coherent radar; Full coherent; Synchronization; Calibration

1 引言

随着人们对雷达探测威力及探测精度要求的不断提高,由此产生了一批大口径雷达,例如美国的SBX雷达,其雷达的天线口径达22.1米,系统总重量5万吨。如此庞大的雷达系统倘若布置在陆地上则难以机动部署,因此无法满足战时对雷达机动部署能力的要求。同时,大口径雷达还具有造价成本高,对器件的工艺要求高等缺点。因此,为了克服大口径雷达的这些固有缺点,美国林肯实验室在2003年提出了分布式孔径全相参雷达的概念^[1]:将

多个雷达或阵列分散布设,通过对多部雷达的回波进行信号层次的融合,达到大口径雷达的性能^[2,3]。一个由 N 部单元雷达构成的分布式全相参雷达,相对于单部雷达而言,其最大输出信噪比可以提高 N^3 倍^[4,5]。

分布式全相参雷达相对于常规大口径雷达而言,由于其单元雷达天线口径的减小,因而更容易实现机动部署。同时,还降低了雷达成本以及对器件的工艺复杂度和精度的要求等^[6,7]。然而,就系统的实现而言,相比于单基地雷达,分布式全相参雷达首当其冲的技术难点就是各单元雷达之间的时间、空间和相位的同步,本文主要讨论时间和相位的同步问题。

关于双(多)基地雷达的时间及相位同步方法

2012-12-21 收到, 2012-12-25 改回; 2012-12-31 网络优先出版

国家自然科学基金(61001198, 61032009)资助课题

*通信作者: 殷丕磊 yinpilei@gmail.com

已有较多的研究,最常用的是三大类方法:间接同步法、直接同步法和独立式同步法^[8]。这些同步方法均能满足双(多)基地雷达的测距同步要求。然而,由于分布式全相参雷达要求各单元雷达的信号需要满足时间和相位的相参性,因此对时间及相位的同步精度要求非常高,双(多)基地雷达的基于无线电信号的同步方法不能直接应用于分布式雷达系统中。

相对于双(多)基地雷达,在分布式全相参雷达系统中各单元雷达的间距较近,结合系统的这一结构特点,我们提出了一种基于有线传输的方式来分别实现时间和相位的同步。本文首先分析了分布式全相参雷达系统的同步误差来源,建立了时间同步误差和相位同步误差的数学模型,提出了通过中心站向各单元雷达分发信号的方式来构成各单元雷达的本振信号,从而消除了晶振频率准确度及稳定性对同步误差的影响,减少了同步误差的来源。本文仿真了同步误差对相参性能的影响,给出了在分布式全相参雷达系统中对时间同步误差及相位同步误差的指标要求。文中基于有线传输的非相关传输方式提出了时间同步方案,基于定标的方式提出了相位同步方案,以分别实现分布式全相参雷达的时间同步和相位同步。

2 同步误差的数学模型

在分布式全相参雷达系统中,两个单元雷达均有自己独立的本振系统,受晶振频率准确度及频率稳定度的影响,两个单元雷达的本振频率会存在不一致误差,可表示为

$$\Delta f(t) = \Delta f_a + \Delta k \cdot t \quad (1)$$

式中, Δf_a 为两晶振的频率准确度的差值, Δk 为两晶振的频率稳定度的差值。

因此,随着工作时间的增长,由于两个单元雷达的频率不一致所引起的时间同步误差 ΔE 及相位同步误差 $\Delta \varphi$ 将逐渐增大,即

$$\Delta E(t) = \left(\Delta f(t) / f_0 \right) t + \Delta \tau + \Delta \varepsilon_t \quad (2)$$

$$\Delta \varphi(t) = 2\pi \cdot \Delta f(t) \cdot t + \Delta \theta + \Delta \varepsilon_\varphi \quad (3)$$

式中, f_0 为晶振的标称频率, $\Delta \tau, \Delta \theta$ 分别为两单元雷达的初始时钟差、两本振信号的初始相位差, $\Delta \varepsilon_t, \Delta \varepsilon_\varphi$ 分别为噪声引起的两单元雷达的随机时间差和随机相位差。

逐渐增大的同步误差将影响分布式雷达的相参性能,必须予以控制。因此,为消除时间因素对同步误差的影响,对单元雷达的本振系统构成,我们提出如下同源本振构成方案:在中心站设置一个高

稳时钟,该时钟可以是原子钟或者高稳石英晶体振荡器,高稳时钟信号经过光纤向两单元雷达分发,在两单元雷达分别对接收信号进行倍频、分频、锁相,从而构成两单元雷达的本振信号。如图1所示。

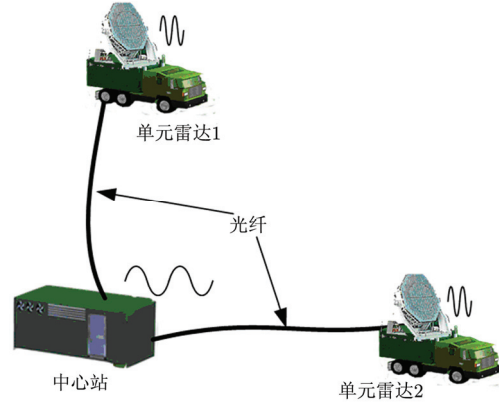


图1 分布式雷达的同源本振构成方案

Fig. 1 The scheme of local oscillator for base unit radar

利用上述同源本振构成方案,我们消除了晶振频率准确度和频率稳定度对同步误差所带来的影响,因此两单元雷达的同步误差将仅由初始时钟差及初始相位差决定,若忽略掉噪声的影响,则式(2)、式(3)简化为

$$\Delta E = \Delta \tau \quad (4)$$

$$\Delta \varphi = \Delta \theta \quad (5)$$

3 同步误差的影响分析

在分布式全相参雷达中,需要对相参参数(两单元雷达与目标的时延差及其相应的相位差)进行估计,从而利用相参参数估计值对两单元雷达发射信号的时间和相位进行调整,以实现两发射信号在目标处同时同相叠加,完成发射相参;然后对两单元雷达的接收信号进行时延和相位的调整,以实现接收相参,从而完成整个系统的全相参工作。然而,当两单元雷达存在时间同步误差 $\Delta \tau$ 时,会导致时间差估计值存在 $2\Delta \tau$ 偏差,从而造成两单元雷达接收回波的时间不一致。因此,若忽略掉其他因素的影响,当两单元雷达仅存在时间同步误差 $\Delta \tau$ 时,则两单元雷达的回波信号经匹配滤波后,可分别设为

$$s_1(t) = \rho_1 \cdot \text{sinc}(0.886\pi t / \tau) \quad (6)$$

$$s_2(t) = \rho_2 \cdot \text{sinc}(0.886\pi(t - 2\Delta \tau) / \tau) \quad (7)$$

式中, ρ_1, ρ_2 为复数,分别表示目标在不同方向的散射强度, τ 为脉压后脉冲宽度, $\Delta \tau$ 为两单元雷达的时间同步误差。

两信号的叠加输出为

$$\begin{aligned}
s(t) &= s_1(t) + s_2(t) \\
&= \rho_1 \cdot \text{sinc}(0.886\pi t / \tau) \\
&\quad + \rho_2 \cdot \text{sinc}(0.886\pi(t - 2\Delta\tau) / \tau) \quad (8)
\end{aligned}$$

如果 $\Delta\tau = 0$ ，则两信号叠加后能量最大，否则，叠加后会存在能量损失。定义由时间同步误差所引起的能量损失比^[9] $L_{\Delta\tau}$ 为

$$L_{\Delta\tau} = 20 \log \left(\frac{\max(s)}{\max(s_{\Delta\tau=0})} \right) \quad (9)$$

类似的，考虑相位同步误差的影响。当两单元雷达存在相位同步误差 $\Delta\theta$ 时，会导致相位差估计值存在 $2\Delta\theta$ 的偏差^[10]，从而造成两单元雷达的接收回波相位不一致。因此，当两单元雷达仅存在相位同步误差 $\Delta\theta$ 而不考虑其他误差时，则两单元雷达的回波经过匹配滤波后，可分别设为

$$s_1(t) = \rho_1 \cdot \text{sinc}(0.886\pi t / \tau) \quad (10)$$

$$s_2(t) = \rho_2 \cdot \text{sinc}(0.886\pi t / \tau) e^{j2\Delta\theta} \quad (11)$$

两信号的叠加输出为

$$\begin{aligned}
s &= s_1 + s_2 \\
&= \text{sinc}(0.886\pi t / \tau) (\rho_1 + \rho_2 e^{j2\Delta\theta}) \quad (12)
\end{aligned}$$

如果 $\Delta\theta = 0$ ，则两信号叠加后能量最大，否则，叠加后有能量损失。定义由相位同步误差所引起的能量损失比 $L_{\Delta\theta}$ ^[9] 为

$$L_{\Delta\theta} = 20 \log \left(\frac{\max(s)}{\max(s_{\Delta\theta=0})} \right) \quad (13)$$

设 $\rho_1 = \rho_2 = 1$ ，图 2 和图 3 分别给出了时间同步误差以及相位同步误差所引起的能量损失比的仿真结果。

从以上仿真可以看出，能量损失比随时间同步误差和相位同步误差的增大而增大。若要求分布式全相参雷达的能量损失比小于 0.3 dB，则应有：

(1) 时间同步误差应小于 0.16τ (τ 为脉压后的脉冲宽度)；

(2) 相位同步误差应小于 15° 。

从以上分析可以看出，分布式全相参雷达对于时间同步误差及相位同步误差的要求非常苛刻，因此，需要设计分布式全相参雷达的时间及相位的同步方案。目前现有的同步方法，按信号的传输方式来分，可以分为无线电信号法与有线通信法两大类。相对于无线电信号同步方法而言，有线通信同步法具有精度高、稳定性好、实时性好、系统使用简单等优点。同时，有线通信还无需考虑保密性、安全性、电磁干扰等其他诸多因素^[11]。因此，基于有线通信方式，我们提出非相关传输^[12]的时间同步方案以及基于定标^[13,14]的相位同步方案。

4 时间同步方案

为实现分布式全相参雷达的时间同步，我们提出采用有线非相关传输的方法来估计时间同步误差 $\Delta\tau$ ，然后对两单元雷达的发射信号进行时延补偿，从而实现两单元雷达的时间同步。

两单元雷达通过光纤连接，有线非相关传输方法的示意图如图 4 所示。

其工作过程为：首先，单元雷达 1 向单元雷达 2 发射同步信号，经过光纤通道传输到单元雷达 2，在单元雷达 2 的计数器得到传输时间 T_2 。然后，单元雷达 2 向单元雷达 1 发射同步信号，经过同一段光纤通道传输到单元雷达 1，在单元雷达 1 的计数器得到传输时间 T_1 ，其时间关系如图 5 所示。

图中， t_{10}, t_{20} 分别为单元雷达 1 和单元雷达 2 的触发时刻， $\Delta\tau = t_{20} - t_{10}$ 为两单元雷达的时间同步误差； t_L 为光纤线路的传输时延； t_{21} 表示单元雷达 2 接收到单元雷达 1 发射信号的时刻， t_{12} 表示单元雷达 1 接收到单元雷达 2 发射信号的时刻； t_{a1} 表

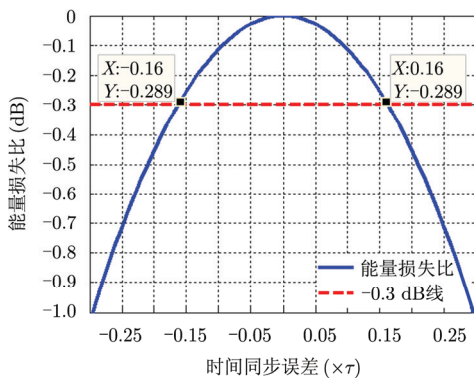


图 2 时间同步误差引起的能量损失比

Fig. 2 Energy loss ratio caused by time synchronization error

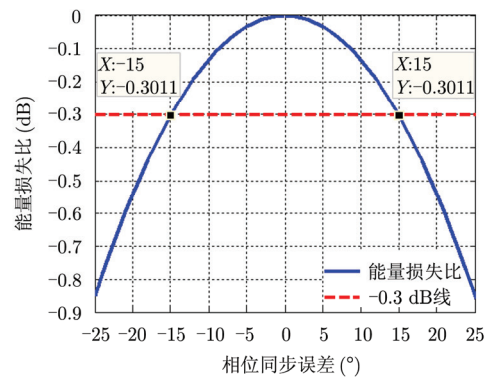


图 3 相位同步误差引起的能量损失比

Fig. 3 Energy loss ratio caused by phase synchronization error

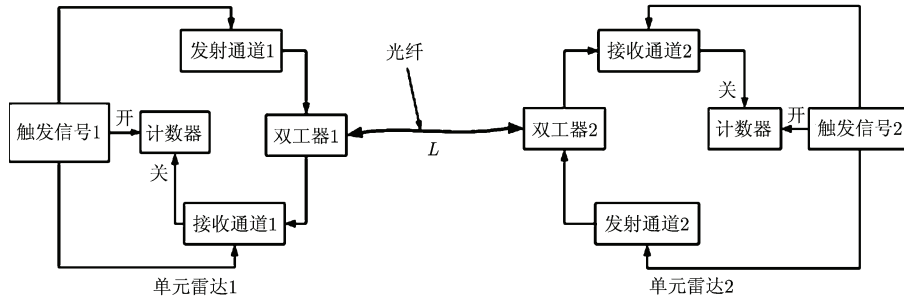


图4 有线非相关传输法的示意图

Fig. 4 Diagram of wired noncorrelation transmission

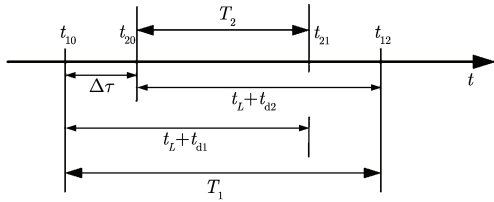


图5 非相关传输的时间关系示意图

Fig. 5 Diagram of time relationship in noncorrelation transmission

示单元雷达1的发射通道延时与单元雷达2的接收通道延时之和, t_{d2} 表示单元雷达2的发射通道延时与单元雷达1的接收通道延时之和, 二者均可通过标称测得。

在单元雷达1处测得的信号传输时间为

$$T_1 = t_{12} - t_{10} = t_L + t_{d2} + \Delta\tau \quad (14)$$

在单元雷达2处测得的信号传输时间为

$$T_2 = t_{21} - t_{20} = t_L + t_{d1} - \Delta\tau \quad (15)$$

因此可得两单元雷达的时间同步误差 $\Delta\tau$ 的估计值为

$$\Delta\hat{\tau} = \frac{(T_1 - T_2) - (t_{d2} - t_{d1})}{2} \quad (16)$$

利用我们所得到的时间同步误差估计值 $\Delta\hat{\tau}$, 对两单元雷达的发射信号进行时延补偿, 即可实现两单元雷达的时间同步。

5 相位同步方案

采用第2节中我们所提出的同源的单元雷达本振系统方案, 则两单元雷达本振信号只存在一个初始相位差 $\Delta\theta$, 因此可以设两单元雷达的本振信号分别为

$$u_1 = e^{j2\pi f_0 t} \quad (17)$$

$$u_2 = e^{j2\pi f_0 t + j\Delta\theta} \quad (18)$$

其中, f_0 表示两单元雷达的本振频率, $\Delta\theta$ 为相位同步误差。

我们提出采用定标的方法来估计相位同步误差, 然后对两单元雷达的本振信号进行相位补偿, 从而实现两单元雷达的相位同步。定标法估计相位同步误差的步骤分为两步: 第1步是雷达内的定标, 第2步是雷达间的定标, 下面分别介绍其原理。

5.1 雷达内的定标

雷达内定标的目的是测量雷达内部各通道所引入的附加相位值, 其示意图如图6所示。通过增加定标控制器模块以控制雷达的定标回路, 从而分别对雷达的发射通道、接收通道所引入的相位值进行标定。

通过定标控制器控制定标信号的传输路径, 可分别获得雷达的接收定标回路和发射定标回路:

接收定标回路: 1→2→3→4→5→6;

发射定标回路: 1→2→7→8→5→6。

定义 α_{t1}, α_{r1} 分别为单元雷达1的发射通道和接收通道所引入的相位, α_{t2}, α_{r2} 分别为单元雷达2的发射通道和接收通道所引入的相位, β 为定标控制器所引入的相位, 该值可通过标称测得。

此处, 以单元雷达1为例进行说明。

在接收定标回路, 定标信号依次经过本振上变频, 定标控制器, 接收通道, 本振下变频, 因此, 可测得此过程所引入的相位为

$$\varphi_1 = \alpha_{r1} + \beta \quad (19)$$

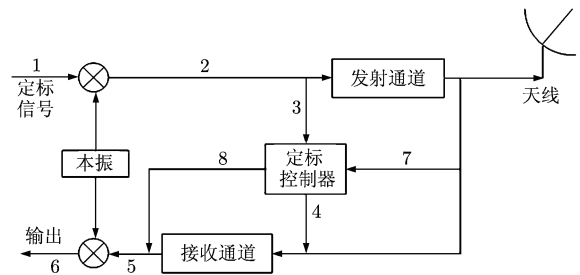


图6 雷达内的定标示意图

Fig. 6 Diagram of calibration in single radar

在发射定标回路，定标信号依次经过本振上变频，发射通道，定标控制器，本振下变频，则测得此过程所引入的相位为

$$\varphi_2 = \alpha_{t1} + \beta \quad (20)$$

从而获得单元雷达 1 的接收通道和发射通道分别引入的相位值

$$\begin{cases} \alpha_{r1} = \varphi_1 - \beta \\ \alpha_{t1} = \varphi_2 - \beta \end{cases} \quad (21)$$

类似的，也可获得单元雷达 2 的接收通道相位

及发射通道所引入的相位值分别为

$$\begin{cases} \alpha_{r2} = \varphi_3 - \beta \\ \alpha_{t2} = \varphi_4 - \beta \end{cases} \quad (22)$$

通过雷达内的定标，获得了两单元雷达发射通道和接收通道所引入的相位值。下面，通过两雷达间的定标获得两单元雷达本振的相位差。

5.2 雷达间的定标

两单元雷达通过光纤连接以构成雷达间的定标回路，如图 7 所示。

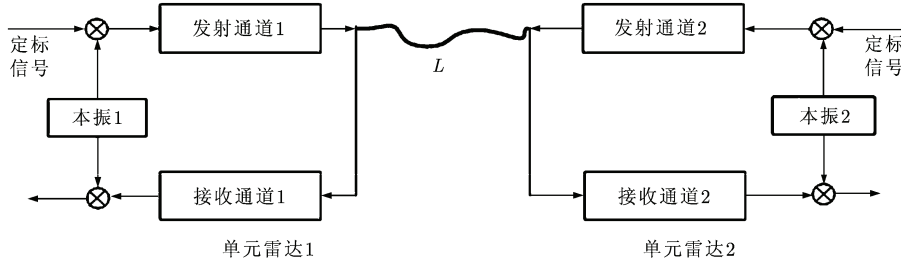


图 7 雷达间的定标回路示意图

Fig. 7 Diagram of calibration between two radars

下面介绍雷达间定标的过程。

首先，单元雷达 1 向单元雷达 2 发射定标信号，则定标信号依次经过单元雷达 1 的本振 1 进行上变频，发射通道 1，光纤链路 L，单元雷达 2 的接收通道 2，最后经过单元雷达 2 的本振 2 进行下变频，则测得此过程引入的相位为

$$\psi_1 = \alpha_{t1} + \alpha_L + \alpha_{r2} - \Delta\theta \quad (23)$$

其中， α_L 为光纤链路所引入的相位。

然后，单元雷达 2 向单元雷达 1 发射定标信号，则信号依次经过单元雷达 2 的本振 2 进行上变频，发射通道 2，光纤链路 L，单元雷达 1 的接收通道 1，最后经过单元雷达 1 的本振 1 进行下变频，则测得此过程引入的相位为

$$\psi_2 = \Delta\theta + \alpha_{t2} + \alpha_L + \alpha_{r1} \quad (24)$$

从而得到两单元雷达的本振相位差的估计值为

$$\Delta\hat{\theta} = \frac{\psi_2 - \psi_1 + \alpha_{t1} + \alpha_{r2} - \alpha_{t2} - \alpha_{r1}}{2} \quad (25)$$

综合雷达内的定标及雷达间的定标这两步定标处理，可得两单元雷达的同步相位差估计值为

$$\Delta\hat{\theta} = \frac{\psi_2 - \psi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4 - \varphi_1}{2} \quad (26)$$

利用我们所得到的相位同步误差估计值 $\Delta\hat{\theta}$ ，对两单元雷达的发射信号进行相位补偿，即可实现两单元雷达的相位同步。

综上所述，利用我们提出的基于有线传输的非相关传输时间同步方案和定标相位同步方案，可以分别实现分布式全相参雷达的时间同步和相位同步，从而为这一新体制雷达的工程实现提供了技术保证。

6 结束语

本文针对分布式全相参雷达这一新体制雷达技术的实现所面临的同步问题，提出了基于中心站信号的同源单元雷达本振系统构成方案，建立了时间同步误差和相位同步误差的数学模型，仿真了同步误差对相参信号能量损失的影响，并给出了时间同步误差和相位同步误差的指标要求。基于有线传输的非相关传输方式提出了时间同步方案，基于定标的方式提出了相位同步方案，以分别实现分布式全相参雷达的时间同步和相位同步。本文的分析与研究对实现分布式全相参雷达这一新体制雷达，具有重要的理论和工程指导意义。

参考文献

- [1] Ahlgren G W. Next generation radar concept definition team final report[R]. MIT Lincoln Laboratory, June 2003.
- [2] Cuomo K M, Coutts S D, McHarg J C, et al. Wideband aperture coherence processing for next generation radar (NexGen)[R]. MIT Lincoln Laboratory, August 2004: 11-16.
- [3] Coutts S D, Cuomo K M, McHarg J C, et al. Distributed

- coherent aperture measurements for next generation BMD radar[C]. Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, MA, USA, 2006: 390-393.
- [4] Fletcher A and Robey F. Performance bounds for adaptive coherence of sparse array radar[C]. Proceedings of the Adaptive Sensors Array Processing Workshop, MIT Lincoln Laboratory, March 2003.
- [5] Brookner E. Phased-array and radar astounding breakthroughs—an update[C]. IEEE Radar Conference, RADAR'08, Rome, Italy, May 26-30, 2008: 1-6.
- [6] Gao Hong-wei, Cao Zhe, Wen Shu-liang, *et al.* Study on distributed aperture coherence-synthesizing radar with several experiment results[C]. IEEE International Conference on Radar, Chengdu, China, Oct. 24-27, 2011, 1: 84-86.
- [7] 姜伟. MIMO 雷达信号处理关键技术研究[D]. [博士学位论文], 北京: 北京理工大学, 2009.
- Jiang Wei. Research on key technologies of MIMO radar signal processing[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009.
- [8] 周鹏. 星机双基地 SAR 系统总体与同步技术研究[D]. [博士学位论文], 成都: 电子科技大学, 2008.
- Zhou Peng. System design and synchronization technique of spaceborne/airborne hybrid bistatic synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [9] 刘炳奇, 肖文书. 一种多基雷达接收信号相参处理的方法[J]. 现代雷达, 2009, 31(5): 30-34, 74.
- Liu Bing-qi and Xiao Wen-shu. A coherent signal processing method for multisite radar system[J]. *Morden Radar*, 2009, 31(5): 30-34, 74.
- [10] 殷丕磊, 杨小鹏, 曾涛. 分布式全相参雷达的相位差跟踪技术[J]. 信号处理(待发表).
- Yin Pi-lei, Yang Xiao-peng, and Zeng Tao. Tracking technology of phase difference for distributed aperture coherent radar[J]. *Signal Processing* (to be published).
- [11] 蔡伟. 双基地激光雷达系统同步方法研究[D]. [硕士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- Cai Wei. Research on synchronization technique of biastatic[D]. [Master dissertation], Xi'an: Xidian University, 2009.
- [12] 胡成. 双基地雷达同步技术研究与同步系统设计[D]. [硕士学位论文], 成都: 电子科技大学, 2003.
- Hu Cheng. Research on synchronization technology and design of synchronization system for bistatic radar[D]. [Master dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003.
- [13] Yang Yang and Blum R S. Phase synchronization for coherent MIMO radar algorithms and their analysis[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(11): 5538-5557.
- [14] 胡光. 频率步进宽带分布式全相参雷达技术研究[D]. [博士学位论文], 北京: 北京理工大学, 2011.
- Hu Guang. Distributed full coherence techniques for stepped frequency wideband radar[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011.

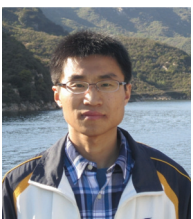
作者简介



曾涛(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向包括雷达系统、雷达信号处理等。



杨小鹏(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向包括空时自适应处理、相控阵技术、雷达系统、探地雷达技术、分布式雷达系统和 MIMO 通信等。



殷丕磊(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向包括分布式雷达技术、自适应信号处理等。

范华剑(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向包括自适应信号处理、实时雷达信号处理等。