

雷达通信一体化共享信号技术研究

杨瑞娟¹, 陈小民², 李晓柏³, 程伟¹

(1.空军预警学院 四系,武汉 430019; 2.空装 军通部,北京 100086; 3.空军预警学院 研究生管理大队,武汉 430019)

摘 要:雷达通信一体化是多功能综合射频系统的一个重要的研究方向,基于信号共享的雷达通信一体化系统因其一体化程度最高而备受关注.针对雷达通信一体化信号设计中存在的不兼容和互干扰问题,对基于频分多载波 Chirp 技术、正交频分复用技术(OFDM)和扩频技术的雷达通信信号共享的可行性和方案进行了研究,并对共享信号雷达目标回波检测方法、共享信号数据调制解调方法以及雷达通信一体化系统性能等方面的基础性问题进行了初步分析.

关键词:多功能综合射频系统;雷达通信一体化;信号共享;多载波;OFDM;扩频技术

中图分类号:TN914;TN95

文献标志码:A

文章编号:2095-5839(2013)01-0039-05

随着技术的发展和信息化作战需要,武器平台上需要装载更多更为复杂的电子系统.电子系统的增加增强了信息作战能力,但也带来了新的问题:①多种电子设备的配备消耗了平台的空间,削弱了作战平台的机动性;②电子设备间存在的电磁干扰会降低平台的作战效能;③信息量的增大要求数据链具有更高的数据传输率和实时性.因此,未来军用电子系统发展的趋势之一是实现多功能电子系统综合一体化^[1-2]、构成多功能综合射频系统^[3-4]、提高设备的可用性和可靠性,可实现资源共享、动态可组和高可利用,同时减小系统电磁干扰和能源消耗,提高电子系统的综合性能.

雷达和通信系统是武器平台广泛配备的2种电子系统,雷达通信系统的一体化^[5]不仅对提高武器平台的作战效能具有重要的军事意义,同时对传感器网络的发展也具有重要作用.

为更高程度地实现多功能综合射频系统的一体化,共享信号是一种有效的途径^[6-8].欧洲电信与雷达国际研究中心率先提出了基于信号共享的雷达通信一体化(Radcom)的概念,即利用一个平台和一种信号实现雷达和通信的功能.雷达通信一体化信号共享技术使用一种雷达通信共享信号进行目标的探测和定位,同时进行信息传输,接收机通过对接收到的共享信号进行处理与解调,分别获得目标信息和通信传输信息.因此,共享信号既作为通信信号同时也作为雷达探测信号,这就是雷达通信信号共享的基本思路.

雷达通信一体化信号共享重点在于研究雷

达通信一体化共享信号产生方法,实现共享信号目标检测与参数测量和数据调制解调技术.由于雷达波束的周期扫描甚至工作于跟踪方式,使得雷达通信一体化系统的数据通信过程可能是断续的,一次通信的有效时间是猝发瞬时的^[9-10],因此,雷达通信一体化必须满足猝发瞬时通信高速同步的要求.本文对雷达通信一体化信号共享技术进行了研究.

1 多载波 Chirp 共享信号技术

线性调频信号是雷达广泛采用的脉冲压缩信号,具有良好的测距测速性能.由于单路 Chirp 信号传输速率低,采用多载波复用技术与线性调频技术相结合可提高系统的通信速率.为避免数据传输对雷达探测的影响,可设计一组多载波 Chirp 信号群,奇数路子载波信号用于通信信息传输,偶数路子载波信号用于雷达目标探测.为提高系统的频带效率,可使各相邻子载波间具备准正交性.系统原理框图如图1所示.接收端,通信采用相干解调的方法,雷达接收机通过并行接收累积,经信号处理获取目标的距离和速度参数.

一组不同载频的多载波 Chirp 信号组 $\{s_k(t) | 0 \leq k \leq N-1\}$ 可以表达为

$$s_k = \text{rect}(t/T) \exp(j2\pi f_k t + j\pi \mu t^2) \quad k=0, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中 $f_k = f_0 + k\Delta f$ 为第 n 个子载波的载频, Δf 为

子载波载频间隔, $\text{rect}(t/T) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < T \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$.

收稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271451)

作者简介: 杨瑞娟(1964-),女,教授,主要从事现代通信技术及其信号处理研究.

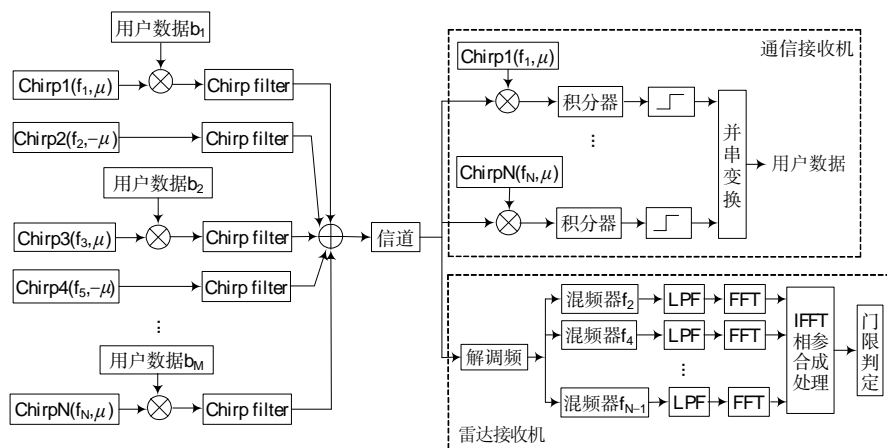


图1 基于多载波 Chirp 共享信号系统框

多载波 Chirp 信号的关键在于利用准正交性来提高系统的频谱效率,即为避免相邻载波信号频带重叠引起严重的干扰,载频相邻的 Chirp 信号应在一定的带宽重叠率下满足准正交的条件。

若在相邻子载波间采用极性相反的调频率,则在小于 25% 的带宽重叠率条件下,信号互相关峰值与自相关峰值的比值小于 -30 dB,可忽略准正交性对信号检测的影响。准正交多载波 Chirp 共享信号宽带模糊函数表示为

$$\Psi_{\text{ff}}(\tau, s) = |\exp(j2\pi(f_0 + k\delta B)(1 - \alpha)\tau) \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} b_k(t) X_u(\tau, (i-k)\delta B + \alpha(f_0 + k\delta B))| \quad (2)$$

式中 $\tau = 2R/c$, s 为尺度因子,且 $s = 1 - 2v/(c+v) = 1 - \alpha$, $\Delta f = \delta B$, δ 为带宽重叠率。当 $i=k$ 时,其为 X_u 的主瓣区域 X_m ; 当 $i \neq k$ 时,其为邻道干扰项 X_l 。

图 2(a) 给出了多载波 Chirp 共享信号宽带模糊函数图特性。由图 2(b) — 2(d) 可以看出,沿多普勒轴的切面主旁瓣比约为 30 dB,沿时间延迟轴的切面在主旁瓣比约为 13.15 dB,在速度—距离平面的主旁瓣比约为 13 dB,其主瓣的性能与单 Chirp 信号相似,主旁瓣比满足目标检测要求,因此,利用多载波 Chirp 信号实现雷达通信一体化方案是可行的。

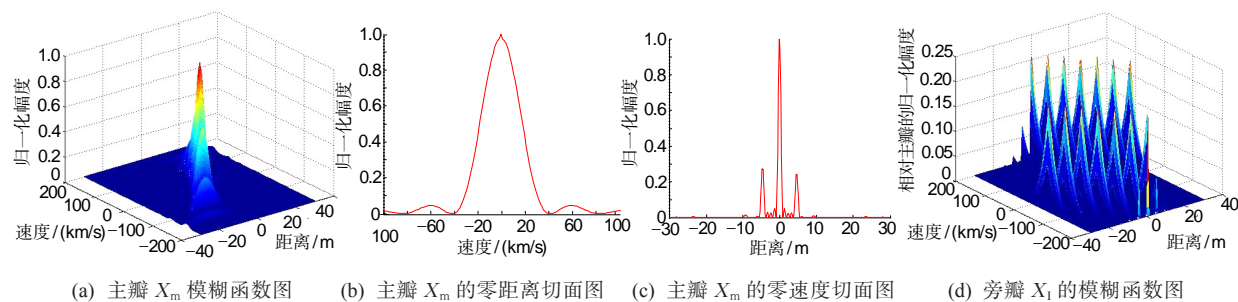


图2 多载波 Chirp 信号的主瓣与旁瓣的模糊图

2 OFDM 共享信号波形技术

OFDM 是一种具有良好抗多径衰落性能的高速数据通信技术。将 OFDM 技术用于新的雷达体制,构成一种大带宽信号,可使雷达获得高分辨率。OFDM 技术在雷达中的应用为雷达通信一体化信号共享找到了新的结合点^[11-12]。通过对 OFDM 雷达信号加载通信信息,在目标探测的同时进行数据通信。接收端通过消除通信信号的随机性来避免对雷达目标探测的干扰。该方案可在获取良好的雷达信号处理性能的优势下,同时大幅度提高通信速率。系统原理如图 3 所示。在接收端,首先提取子载波的幅度和相位信息,

再进行相应的雷达信号处理和通信数据解调。

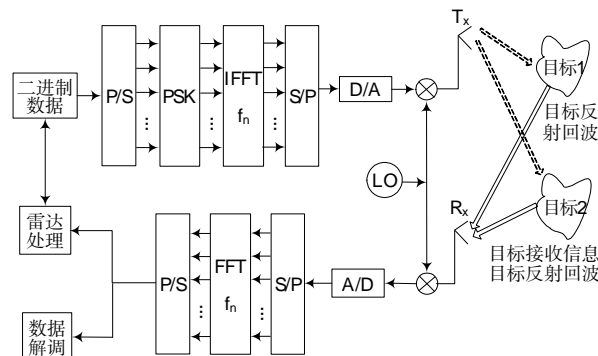


图3 基于 OFDM 共享信号方案系统结构框图

OFDM 信号的宽带模糊函数如图 4 所示。该信号的模糊函数近似图钉型,属于第 4 类模糊

函数,具有单一的中心峰值,其它的能量分布于距离多普勒平面,狭窄的中心峰值意味着具有很高的距离和多普勒分辨率,测距和测速精度较高,其主旁瓣比大约为 15.4 dB. OFDM 信号模糊函数表明,该信号具有优良的距离和多普勒分辨率特性和测速、测距精度.

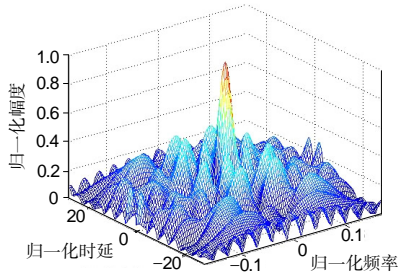


图4 OFDM 雷达信号模糊函数

对于加载了通信数据的 OFDM 雷达信号,消除通信数据波形对目标检测影响的方法有多种. 本文给出一种通过对发送数据信号和接收解调数据信号的比值进行 IDFT 变换来获取目标距离、速度参数的方法原理. OFDM 调制信号表示为

$$x(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{\text{sym}}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} d(\mu N_c + n) \exp(j2\pi f_n t) \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_{\text{OFDM}}}{T_{\text{OFDM}}}\right) \quad (3)$$

式中 μ 为 OFDM 符号指数, T_{OFDM} 为一个 OFDM 符号的持续时间, f_n 为子载波频率,每个子载波上加载有用用户数据 $d(\mu N_c + n)$, 距离 R 处的目标的反射信号可以表示为

$$y(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{\text{sym}}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} A(\mu, n) d_{\text{Tx}}(\mu N_c + n) \exp(j2\pi f_n (t - \frac{2R}{c_0})) \cdot \exp(j2\pi f_D t) \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_{\text{OFDM}} - \frac{2R}{c_0}}{T_{\text{OFDM}}}\right) \quad (4)$$

式中 $d_{\text{Tx}}(\cdot)$ 为原始用户数据, f_D 为由目标的相对运动所引起的多普勒频移, $A(\mu, n)$ 为信道衰落系数.

雷达接收回波,并进行 OFDM 解调,可得到接收数据信号

$$d_{\text{Rx}}(\mu N_c + n) = A(\mu, n) d_{\text{Tx}}(\mu N_c + n) \exp(-j2\pi \Delta f \frac{2R}{c_0}) \cdot \exp(j2\pi \mu T_{\text{OFDM}} \frac{2v_{\text{rel}} f_c}{c_0}) \quad (5)$$

于是,频域信道传输函数可表示为

$$\frac{d_{\text{Rx}}(\mu N_c + n)}{d_{\text{Tx}}(\mu N_c + n)} = A(\mu, n) \exp(-j2\pi \Delta f \frac{2R}{c_0}) \exp(j2\pi \mu T_{\text{OFDM}} \frac{2v_{\text{rel}} f_c}{c_0}) \quad (6)$$

式中包含有距离和速度信息. 通过对其进行 IDFT 变换就可以得到信道脉冲响应的采样值(雷达距离像),从而获取目标距离、速度参数.

3 扩频共享信号波形技术

扩频信号是一种低截获率通信信号,用作雷达探测目标时,可以同时得到距离分辨率和探测距离. 雷达通信一体化共享信号设计中,为了避免确定性的雷达信号与随机性通信信号的相互影响,可基于扩频正交技术来实现波形共享.

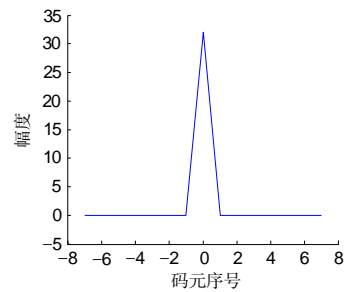
在各种扩频序列中, Frank 码、P 码、Oppermann 码等多相码^[13]具有良好的伪随机性、非周期自相关特性,且数目多. 并且,采用完全互补序列,可以构造出自相关特性和互相关特性都接近理想情况的特征码,以满足雷达通信一体化信号共享的要求.

考虑由 M 个序列构成的序列集合 $\{S_{11}, S_{12}, S_{13}, \dots, S_{1M}\}, \dots, \{S_{M1}, S_{M2}, S_{M3}, \dots, S_{MM}\}$, 每一个序列集合都构成一个补码,而且任意 2 个补码中所对应序列的互相关函数的和为零,即

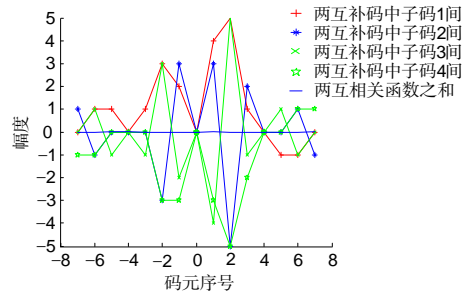
$$\sum_{p=1}^M r_{S_{mp} S_{np}} = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{N-k} S_{mpl} S_{np(l+p)}^* = 0 \quad \forall k; m, n \in \{1, 2, \dots, M\}, m \neq n \quad (7)$$

则这样的 M 个补码构成的互补码集就是一个 M 阶的完全互补码.

采用串连矩阵扩展^[14-15]的构造方法,构造出一种完全互补码集. 它将对码长为 4 的序列扩展为码长为 8 的互补码对,其互补码对的自相关函数和互相关函数如图 5 所示. 由图 5 可以看出,在零多普勒频移下,自相关函数旁瓣为零,主瓣呈现为一个理想的 Kronecker Delta 函数,互相关函数的和为零,其每组互补码间不存在相互间干扰.



(a) 互补码的自相关函数



(b) 互补码的互相关函数

图5 互补码的自相关函数和互相关函数
基于完全互补码的第 k 个通道结构示意图

如图6所示,其中 F_k 是第 k 个数据传输通道频率, f_{k1} 、 f_{k2} 、 f_{k3} 、 f_{k4} 是子载波的基带频率, r_k 表示经过信道传输的接收信号。 $[A_{k0}, A_{k1}, A_{k2}, A_{k3}]$ 和 $[B_{k0}, B_{k1}, B_{k2}, B_{k3}]$ 分别代表2对完全互补码,发射信号包括4个载波的相位编码信号,其载频分别为 $F_k + f_{k1}$ 、 $F_k + f_{k2}$ 、 $F_k + f_{k3}$ 、 $F_k + f_{k4}$, Out_1 和 Out_2 为相同通信信号输出, Out_3 为雷达的回波接收信号。

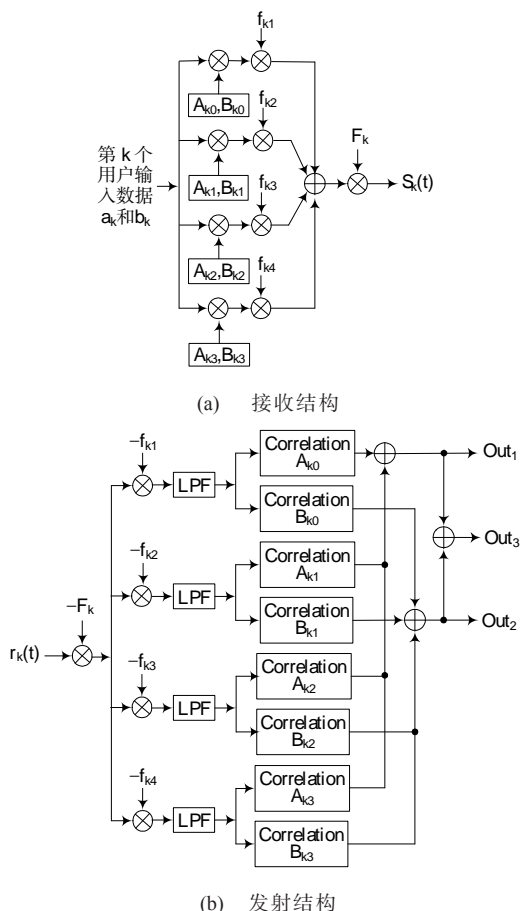


图6 基于完全互补码的第 k 个用户的接收和发射结构

4 结束语

基于信号共享的雷达通信一体化的特殊之处在于将通信信号隐藏于雷达信号之中,实现了复杂多电子装备平台中雷达和通信信号能量和时间的完全一体化。因此,深入研究雷达通信共享信号技术可为我国实现雷达通信装备一体化奠定理论和技术基础,能在雷达通信共享信号理论、波形设计和系统设计等方面取得原创性成果。

参考文献:

[1] TAVIK G C, HILTERBRICK C L, EVINS J B, et al. The advanced multifunction RF concept[J]. IEEE Trans.

MTT, 2005, 53(3):1009-1020.

- [2] RUSSELL M E. Future of RF technology and radars[C]// IEEE Radar Conference. 2007:11-16.
- [3] VAN ROSSUM W L, DE WIT J J M, OTTEN M P G, et al. SMRF architecture concepts[J]. IEEE Electronic Systems Magazine, 2011(5):12-17.
- [4] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2010:87-94.
- [5] 李廷军, 任建存, 赵元立. 雷达-通信一体化研究[J]. 现代雷达, 2001, 23(2):1-2.
- [6] XU Cui-chun, CHAN Tian-qi. Conception of signal sharing in integrated radar and jammer system and the integrated signal design[C]// IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. IEEE, 2002:502-505.
- [7] VAN GENDERRAN P. A communication waveform for radar[C]//2010 8th International Conference on Communications (COMM). 2010:289-292.
- [8] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟. 基于分数阶傅里叶变换的雷达通信一体化信号共享研究[J]. 信号处理, 2012, 28(4): 487-494.
- [9] VAN GENDERRAN P. Recent advances in waveforms for radar, including those with communication capability [C]//Proc. of European Radar Conference. Rome, Italy, 2009:318-325.
- [10] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟. 雷达自组网通信性能研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(6): 23-27.
- [11] BRAUN M, STURM C, NIETHAMMER A, et al. Parametrization of joint OFDM-based radar and communication systems for vehicular applications[C]// PIMRC' 2009. Tokyo, Japan, 2009:3020-3024.
- [12] DONNET B J, LONGSTAFF I D. Combining MIMO radar with OFDM communications[C]// Proc. 3rd European Radar Conference. 2006:37-40.
- [13] PETTERSSON M I, ZEPERNICK H J, JAMIL M. Performance assessment of polyphase pulse compression codes[C]// ISSSTA' 2008. IEEE, 2008:166-172.
- [14] LI Xiao-bai, YANG Rui-juan, CHEN Wei. Research of constructing method of complete complementary sequence in integrated radar and communication [C]// IEEE 2012 International Signal Processing Conference. Beijing, China, 2012:1067-1070.
- [15] HIDEYUKI TORI I, MAKOTO NAKAMURA, NAOKI SUEHIRO. Generalized method for constructing modulatable periodic complete complementary codes[C]// Third IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. 2001: 261-262.

Study of Signal Sharing Technologies for Integration of Radar and Communication Systems

YANG Rui-juan¹, CHEN Xiao-min², LI Xiao-Bai³, CHENG Wei¹

(1.No.4 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2.Branch of OAK, Department of AirForce Equipment, Beijing 100086, China; 3.Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Integration of Radar and Communication (Radcom) systems is one of the important research areas in multi-functional integrated radio frequency systems (MFIRFS). More attentions are paid to the integration of Radcom systems based on signal sharing, due to its maximum degree of integration. Considering that there exists some problems of signals being not compatible and having mutual interference in the signal design for the integration of Radcom systems, this paper studys the feasibility and its scheme of Radcom signal sharing based on the techniques of frequency division multi-carrier chirp signal, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and spread spectrum, and makes an introductory analysis of detection of radar target echoes and demodulation of data with signal sharing, and certain basic problems of performance on integration of Radcom systems and others.

Key words: multi-functional integrated radio frequency systems; intergation of radar and communication; signal-sharing; multicarrier; OFDM; spread spectrum technology

(上接第 35 页)

Method of Target Track Optimization in Doppler Blind Zone

HAN Wei¹, TANG Zi-yue², ZHU Zhen-bo², ZHANG Bin³

(1.Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2.No.3 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 3.No.2 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Airborne early warning radars, which employ the pulse Doppler (PD) system, have good detection performance on low altitude detection, while its inherent Doppler blind zone can result in the targets in this zone being un-detected, which accordingly causes the target track to be terminated and of restarting batch. Aimed at the target tracking in Doppler blind zone, a method of target track optimization based on Doppler prediction is proposed in this paper. First, the reasons why the Doppler blind zone exists are analyzed, next, on the basis of traditional adaptive rule of track temporary disappearance, an optimized rule of temporary disappearance is proposed by combining with the plot prediction after the extended Kalman filter (EKF) processing, and then the ability of track maintenance is assessed by introducing a track quality score, and finally, the feasibility of this proposed rule are verified by simulation and experiments .

Key words: Doppler blind zone; track optimization; rule of track temporary disappearance; plot prediction

(上接第 38 页)

Analysis of Registration Algorithm for Two-dimensional Multi-sensor Error

ZHU Hong-wei¹, ZHOU Can-kai², TANG Xiao-ming¹, HE You¹

(1.Institute of Electronics and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2.Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing 400037, China)

Abstract: Focusing on the registration problem for two-dimensional multi-sensor error, this paper discusses the existing typical sensor error estimation algorithms, including the real-time quality control algorithm, the least square algorithm, the generalized least square algorithm, the real-time error registration algorithm based on Kalman filtering and the exact maximum likelihood algorithm. First, the models and principles of these algorithms mentioned are analyzed and compared. Then, a reasonable simulation environment is set up, where the simulative comparison of system error estimation performance out of various algorithms are performed, and finally, the performances and their advantages and disadvantages of various algorithms are analyzed, which offers a reliable reference for selecting various algorithms according to different environment in application.

Key words: two-dimensional multi-sensor; least square algorithm; generalized least square algorithm; real time error registration algorithm; exact maximum likelihood algorithm