

一种双基地雷达时间同步的新方法

刘继业, 陈西宏, 刘 强, 孙际哲
(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

摘要:提出了一种基于对流层散射双向时间比对的双基地雷达时间同步的新方法(TWT³S),利用对流层散射通信设备进行雷达站间双向时间比对以求取雷达站间精确的时间差。详细推导了TWT³S的计算模型,对时间间隔测量误差、发射与接收设备时延误差、对流层时延误差、几何距离时延误差进行了讨论,并给出了TWT³S的理论精度。计算结果表明,对流层时延误差是最主要的误差来源,占有所有误差的90%以上。TWT³S模型的理论精度为15~21 ns,比采用微波或光纤直接同步法精度高,为双基地雷达时间同步提供了新的思路。

关键词:双基地雷达;双向时间比对;对流层散射通信;误差分析

中图分类号: V271.4; TN953.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)04-0010-05

A Novel Method for Time Synchronization of Bistatic Radar System

LIU Ji-ye, CHEN Xi-hong, LIU Qiang, SUN Ji-zhe

(College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A novel method for time synchronization of bistatic radar system is put forward based on two-way time transfer via troposphere scattering (TWT³S). In order to get accurate time difference of the radar stations, the troposphere scattering communication equipments are employed to contrast bilateral time signals. Firstly, the calculation model of TWT³S is deduced in detail. Then the time interval measurement error, the launching and receiving device delay error, the tropospheric delay error and the geometrical distance error are studied. Finally, theoretical precision of TWT³S is presented. The computational results demonstrate that tropospheric delay error is the main error, which accounts for more than 90% of all errors. Further more, theoretical precision of TWT³S system is 15~21 ns, and obviously it has a better performance compared with the direct synchronization method via microwave or optical fiber channel. The work provides a new way for time synchronization of bistatic radar system.

Key words: bistatic radar; two-way time transfer; troposphere scattering communication; error analysis

0 引言

随着隐身技术、综合电子干扰、超低空突防和反辐射导弹技术的高速发展,传统单基地雷达面临着严重的生存威胁,而双基地雷达由于收发分置,具有抗“四大威胁”的优势,由此带来的高精度时间同步技术是其重要技术基础之一,也是实现高精度距离解算的关键技术^[1-2]。目前,常用的双基地雷达时间同步方法是采用微波或光纤直接同步法,远远达不到双基地雷

达对时精度要求为数十纳秒的标准。另外,近几年提出的卫星双向中继法、GPS卫星授时和搬运钟法虽然能够满足精度要求^[3],但卫星在空间轨道上运行容易受到干扰,抗干扰能力差。因此,研究精度高、抗干扰能力强的双基地雷达时间同步技术具有十分重要的现实意义。

对流层散射通信是利用对流层大气的不均匀性对无线电波的反射或散射作用实现的一种超视距通信方式,具有单跳通信距离大、可靠性高、保密性好等优点,另外,散射通信无需高架天线,便于伪装隐蔽,展开和撤收方便,十分适合战术级双基地雷达时间同步技术的需要。

在高精度时间同步领域,卫星双向时间频率传递

收稿日期:2013-06-07

修回日期:2013-06-23

基金项目:国家自然科学基金(61172169)

作者简介:刘继业(1989—),男,山东菏泽人,硕士生,研究方向为高精度时间同步技术。

技术(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)是最精确的时间同步技术,该方法能够抵消大部分由于近似对称性路径上造成的时延误差,其同步误差小于1 ns^[4]。因此,参照TWSTFT提出了基于对流层散射的双向时间比对模型(Two-Way Time Transfer via Troposphere Scattering, TWT³S),用于双基地雷达的时间同步。首先推导了基于对流层散射双向时间比对系统的计算模型,接着对影响该时间比对技术精度的主要误差源进行了系统分析,最后给出了TWT³S系统的理论精度。

1 基本原理

双基地雷达设置主站A和从站B,主站配备全向天线,从站配备定向天线,其余设备相同。两个站间利用专用的对流层散射通信时间同步设备,通过互相传递时间信息进行比较,由于散射通信链路是对称或者近似对称的,双向时间信号传输的延迟能够大部分抵消。设计的TWT³S系统如图1所示,具体原理是:雷达站A和B分别在自己原子钟的钟面同一时刻向对方发送1 pulse/s(pps)信号,同时,各自本地的时间间隔计数器(TIC)开始计时,信号经过对流层散射后被对方接收。雷达站A接收到雷达站B的1 pps的前沿关闭TIC,测得时间间隔为 T_A 。雷达站B接收到雷达站A的1 pps的前沿关闭TIC,测得时间间隔为 T_B 。

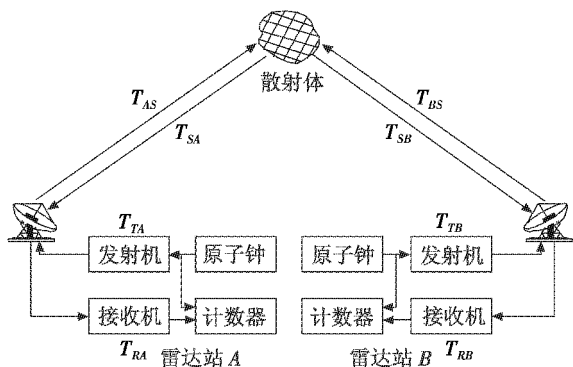


图1 TWT³S系统结构图

Fig. 1 Block diagram of TWT³S system composition

设雷达站A和B的时间差为 Δt , T_{AB} 为雷达站A到雷达站B的传输时延, T_{BA} 为雷达站B到雷达站A的传输时延。 T_{TA} 、 T_{RA} 分别为雷达站A的发射、接收设备时延, T_{AS} 、 T_{SA} 为雷达站A相对散射体上行和下行信号的几何距离时延, T_{TB} 、 T_{RB} 分别为雷达站B的发射、接收设备时延, T_{BS} 、 T_{SB} 为雷达站B相对散射体上行和下行信号的几何距离时延, T_{S1} 、 T_{S2} 分别为雷达站A和雷达站B发射信号在对流层中的散射时延。TWT³S系统时序如图2所示。

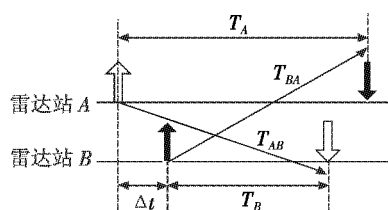


图2 TWT³S时序图

Fig. 2 Sequence diagram of TWT³S system

T_{AB} 为雷达站A到雷达站B的传输时延, T_{BA} 为雷达站B到雷达站A的传输时延,由图1可知, $T_{AB} = T_{TA} + T_{AS} + T_{S1} + T_{SB} + T_{RB}$, $T_{BA} = T_{TB} + T_{BS} + T_{S2} + T_{SA} + T_{RA}$ 。由图2可得

$$\begin{cases} T_A = \Delta t + T_{TB} + T_{BS} + T_{S2} + T_{SA} + T_{RA} \\ T_B = -\Delta t + T_{TA} + T_{AS} + T_{S1} + T_{SB} + T_{RB} \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)中的 T_A 与 T_B 相减,可得

$$\Delta t = \frac{T_A - T_B}{2} + \frac{T_{TA} - T_{RA} + T_{RB} - T_{TB}}{2} + \frac{T_{AS} - T_{SA} + T_{SB} - T_{BS} + \frac{T_{S1} - T_{S2}}{2}}{2} \quad (2)$$

在式(2)中,右边第1项为两雷达站TIC所测的时间间隔差,第2项为两雷达站设备的发射和接收时延差,第3项为信号空间传播的路径时延差,第4项为信号在对流层中的散射时延差。要精确计算雷达站间时间差,必须详细计算信号的空间传播路径差。以 T_{AS} 为例, $T_{AS} = T_{AS}^C + T_{AS}^{geo} + \Delta T_{AS}$,式中, T_{AS}^C 为雷达站A到散射体的地球引力时延, T_{AS}^{geo} 为雷达站A到散射体的几何距离时延,由于散射体和雷达站运动不同,增加几何距离时延改正 ΔT_{AS} 。则雷达站间时间差为

$$\begin{aligned} \Delta t = & \frac{T_A - T_B}{2} + \frac{T_{TA} - T_{RA} + T_{RB} - T_{TB}}{2} + \frac{T_{S1} - T_{S2}}{2} + \\ & \frac{T_{AS}^C - T_{SA}^C + T_{SB}^C - T_{BS}^C + T_{AS}^{geo} - T_{SA}^{geo} + T_{SB}^{geo} - T_{BS}^{geo}}{2} + \\ & \frac{\Delta T_{AS} - \Delta T_{SA} + \Delta T_{SB} - \Delta T_{BS}}{2} \quad (3) \end{aligned}$$

因此,TWT³S系统模型的误差来源于时间间隔测量误差、发射和接收设备时延误差、对流层时延误差、地球引力时延误差、几何距离时延误差。由于对流层散射一般发生在大气40 km以下,地球引力时延误差可以忽略不计,因此从其他4个方面进行误差源分析。

2 误差源分析

2.1 时间间隔测量误差

时间间隔测量技术广泛应用于高精度授时及时间比对等领域,国内外对此进行了广泛的研究。普通的时间间隔测量仪器采用脉冲填充法,测量误差在纳秒

量级。高精度测量方法有基于 AD 变换器的模拟时间 - 幅度转换法、基于冲击振荡器的频率游标法、基于模拟时间扩展的计数法和基于延迟线的时间 - 数字变换器法,测量误差在皮秒量级,但是设备庞大复杂,成本高昂,不适合战术级双基地雷达的要求^[5-6]。国内外许多专家长期进行着高精度、低成本、设备简单的时间间隔测量方法。

文献[7]提出了一种新的基于延迟线技术的测量方法,其基本原理是构建由 n 个延迟单元构成的延迟链,将填充脉冲按顺序延迟 n 次,则共有 $n+1$ 个相位呈规律性顺延的填充脉冲信号,在同一计数闸门下进行计数,得到 $n+1$ 个计数值 $N_i (i=1,2,\dots,n+1)$,用它们的算术平均值作为填充脉冲的计数值。经过构建相应的硬件电路,进行了验证,经测试,最大测量误差为 500 ps。

文献[8]利用 1 pps 信号本身的周期性,采用不同分辨率的测量方法对被测时间间隔进行分层次测量并修正,经实验验证测量误差为 100 ps。由此可见,目前由时间间隔计数器测量产生的误差可以实现皮秒量级。

2.2 发射与接收设备时延误差

发射与接收设备时延误差主要包括调制解调器误差、电缆时延误差和收发设备随气象条件(主要是温度)的变化误差等。

对于 TWT³S 系统,雷达站 A 本地精密原子钟产生的 1 pps 信号通过调制变成 70 MHz 中频信号,然后经过混频将此中频信号搬运到 4.4 ~ 5 GHz 的散射射频频段上,信号到达雷达站 B 后,经过解调后得到本地时间基准与雷达站 A 的时刻差。由此可见,信号在经过调制和解调的过程中都会产生时延误差。文献[9]指出,由调制解调器产生的时延误差值为 30 ~ 100 ps。

电缆时延主要是由两站间电缆长度不完全一致造成的,在双基地雷达系统中,雷达主站和从站除了天线不同外,其余设备均相同。而且由于双向比对,两条路径相减能够较好地消除或削弱时延误差,此项可以忽略不计。

收发设备随气象条件变化误差主要与温度有关,根据实验测得发射时延温度系数为 (-50 ± 10) ps/°C,接收时延温度系数为 (-150 ± 10) ps/°C,整个温度系数为 (-100 ± 30) ps/°C^[9]。据此可推算,两雷达站间因为温度导致误差大约为 100 ~ 300 ps。

根据以上分析,发射与接收设备总的时延误差为 130 ~ 400 ps。

2.3 对流层时延误差

根据湍流散射理论,在对流层中存在着湍流运动,其中充满着涡旋,这种涡旋是介电常数局部不均匀体,在无线电波照射下,变成偶极子,称之为散射体,发

射天线和接收天线都能“看见”的那部分空间中的散射体决定着散射通信。对流层大气对 0 ~ 15 GHz 的无线电波信号呈中性,信号在其中传播会产生非色散延迟,导致电波的实际传播路径比几何路径长,在实际工程应用中,多用对流层改正模型进行计算。常用模型有 Hopfield 模型和 Black 模型^[10],应用最广泛的是 Hopfield 改正模型^[11]。

$$\delta_{\rho_{\text{trop}}} = \frac{K_d}{\sin(E^2 + 6.25)^{1/2}} + \frac{K_w}{\sin(E^2 + 6.25)^{1/2}} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} K_d = 1.552 \times 10^{-5} \frac{P_s}{T_s} (h_d - h_s) \\ K_w = 1.552 \times 10^{-5} \frac{4810}{T_s^2} e_s (h_w - h_s) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} h_d = 40136 + 148.72(T_s - 273.16) \\ h_w = 11000 \end{cases} \quad (6)$$

雷达站的水气压为

$$e_s = e_w - 4.5 \times 10^{-4} (1 + 1.68 \times 10^{-8} T_w) (T_s - T_w) P_s \quad (7)$$

饱和水气压为

$$e_w = 1013.246 \left(\frac{373.16}{T_w} \right)^{5.02808} e^{-g(T_w)} \quad (8)$$

其中

$$g(T_w) = g_1(T_w) + g_2(T_w) + g_3(T_w) \quad (9)$$

$$g_1(T_w) = 18.19728 \left(\frac{373.16}{T_w} - 1 \right) \quad (10)$$

$$g_2(T_w) = 0.0187265 (1 - e^{-8.03945(373.16/T_w - 1)}) \quad (11)$$

$$g_3(T_w) = 3.1813 \times 10^{-7} e^{26.1205(1 - 373.16/T_w) - 1} \quad (12)$$

式中: T_s 为雷达站的气温,单位为 K; P_s 为雷达站的气压单位为 hPa; e_s 为雷达站的水气压,单位为 hPa; h_s 为雷达站的高,单位为 m; E 为雷达站的仰角,单位为 (°)。选取标准气象条件,即 $T_s = 291.16$ K, $P_s = 1013.25$ hPa, $h_s = 50$ m, $E = 15^\circ$, 经计算, $\delta = 4.6420$ m, 换算成时延误差为 $\tau = 15.4080$ ns, 选取不同气象条件进行计算,时延误差为 15 ~ 20 ns。在实际应用中,应根据雷达站所处位置的气象条件计算当次的对流层时延值。

2.4 几何距离时延误差

在地心非旋转坐标系中,地面雷达站和散射体在不断地运动,由于无线电波传输速度的有限性、两雷达站时间的不同步性以及设备时延的存在,会导致计算时刻雷达站和散射体位置与测量时刻的位置不同,因此,计算两站间相对钟差时,必须加上由于散射体和雷达站运动引起的时延改正。参照 TWSTFT 系统,直接给出因散射体和雷达站运动引起的时延改正项表达式^[12]。

$$\frac{\Delta T_{AS} - \Delta T_{SA} + \Delta T_{SB} - \Delta T_{BS}}{2} = \frac{\rho_{AS} \dot{x}_A}{c^2} - \frac{\rho_{BS} \dot{x}_B}{c^2} + \frac{\rho_{AS} \dot{x}_S}{2c\rho_{AS}} \delta t -$$

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{AS}\dot{x}_A}{2c\rho_{AS}}\delta t + \frac{\rho_{BS}\dot{x}_S}{2c\rho_{BS}}\delta t - \frac{\rho_{BS}\dot{x}_B}{2c\rho_{BS}}\delta t + \frac{\rho_{AS}\dot{x}_A}{2c\rho_{AS}}(T_{AS}^{tro} + T_{SA}^{tro}) - \\ & \frac{\rho_{BS}\dot{x}_B}{2c\rho_{BS}}(T_{BS}^{tro} + T_{SB}^{tro}) + \frac{\rho_{AS}\rho_{AS}\ddot{x}_A}{c^3} - \frac{\rho_{AS}\dot{x}_A\dot{x}_A}{c^3} + \frac{\rho_{AS}\dot{x}_S\dot{x}_A}{c^3} - \\ & \frac{\rho_{BS}\rho_{BS}\ddot{x}_B}{c^3} + \frac{\rho_{BS}\dot{x}_B\dot{x}_B}{c^3} - \frac{\rho_{BS}\dot{x}_S\dot{x}_B}{c^3} + \frac{\rho_{BS}\ddot{x}_B}{c^2}\Delta T_{AB} + \\ & \frac{\dot{x}_B\dot{x}_B}{c^2}\Delta T_{AB} - \frac{\dot{x}_S\dot{x}_B}{c^2}\Delta T_{AB} + \frac{\rho_{AS}\ddot{x}_S}{2c^2}\delta t + \frac{\dot{x}_S\dot{x}_S}{2c^2}\delta t - \\ & \frac{\rho_{AS}\ddot{x}_A}{c^2}\delta t + \frac{\dot{x}_A\dot{x}_A}{c^2}\delta t - 3\frac{\dot{x}_S\dot{x}_A}{c^2}\delta t + \frac{\rho_{BS}\dot{x}_S}{2c^2}\delta t + \frac{\dot{x}_S\dot{x}_S}{2c^2}\delta t - \\ & \frac{\rho_{BS}\ddot{x}_B}{c^2}\delta t + \frac{\dot{x}_B\dot{x}_B}{c^2}\delta t - 3\frac{\dot{x}_S\dot{x}_B}{c^2}\delta t \end{aligned} \quad (13)$$

式中： $c = 299792458$ m/s,为光速； ρ_{AS} 、 ρ_{SA} 为归算时刻散射体相对雷达站 A 接收天线中心上行和下行的几何距离； ρ_{BS} 、 ρ_{SB} 为归算时刻散射体相对雷达站 B 接收天线中心上行和下行的几何距离； \dot{x}_A 、 \dot{x}_A 、 \dot{x}_S 、 \dot{x}_S 、 \dot{x}_B 、 \dot{x}_B 为雷达站 A、散射体、雷达站 B 在归算时刻的速度和加速度。

在地心非旋转坐标系中,地面雷达站和散射体的速度与加速度可近似表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \omega \times x_i \\ \ddot{x}_i = \omega \times (\omega \times x_i) \end{cases} \quad (14)$$

式中： \dot{x}_i 为速度； \ddot{x}_i 为加速度； x_i 为地心矢量； ω 为地球自转角速度， $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60) \approx 7.2722 \times 10^{-5}$ rad/s。取地面雷达站的 $x_i = 6378.137$ km,由于对流层散射体一般距地面 40 km 以内,因此对流层散射体高度分别取 10 km、20 km、30 km、40 km 进行计算,计算值如表 1 所示。

表 1 散射体与雷达站的速度和加速度值

Table 1 Speed and acceleration of scatter and radar station

散射体高度/km	散射体速度/(m·s ⁻¹)	散射体加速度/(m·s ⁻²)	雷达站速度/(m·s ⁻¹)	雷达站加速度/(m·s ⁻²)
10	464.4673	0.0338		
20	465.2857	0.0338	463.8312	0.0337
30	466.0129	0.0339		
40	466.7401	0.0339		

假设散射体位于两雷达站间几何距离中心处,将散射体与雷达站的速度和加速度值分别代入式(13)进行计算,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同散射体高度下几何距离时延误差值

Table 2 Geometrical distance error under different scatter heights

散射体高度/km	10	20	30	40
时延/ps	6.3438	14.5334	21.8104	29.0874

从表 2 可以看出,由几何距离时延引起的误差大约为 6 ~ 30 ps。

3 对流层散射双向时间比对的理论精度

假设各类误差之间相互独立,对每一单独误差源的误差分析进行组合,可以得到对流层散射双向时间比对的理论精度。

由表 3 可以看出,基于 TWT³S 的双基地雷达双向时间比对同步方法的理论误差为 15.1 ~ 21 ns,较直接采用时间误差为 0.1 μs 的光纤和微波通道时间同步方法高出许多量级^[1],与 GPS 共视法 20 ns 的精度相当^[3],但比 GPS 共视法容易实现,而且对流层散射通信信道的保密性和抗干扰性比 GPS 卫星信道强。在所有误差源中,时间间隔测量误差为皮秒量级,随着相关研究的深入以及新方法的采用,预计该项误差会越来越小;设备时延误差为皮秒量级,可以在操作前通过计算和测量进行补偿,以此减小该项误差;几何距离时延误差为皮秒量级,是相对误差最小的一项;误差最大、最难精确计算的是对流层时延误差,为纳秒量级,占有误差的 90% 以上。

表 3 TWT³S 系统时间同步总误差

Table 3 Overall error of TWT³S system

时间间隔测量/ps	发射接收设备时延/ps	对流层时延/ns	几何距离时延/ps	总误差/ns
100	130	15	6	15.3
500	400	20	30	21

4 结论

双向时间比对是一种高精度时间同步技术,在卫星导航领域应用广泛,借鉴卫星双向时间传递技术,提出了一种基于对流层散射的双基地雷达时间同步的新方法,并进行了该方法的误差源分析与精度分析,结果表明,TWT³S 模型的理论精度为 15 ~ 21 ns,比直接采用光纤和微波通道时间同步法精度高,与 GPS 共视法精度相当,但比 GPS 共视法容易实现,为双基地雷达时间同步提供了新的思路。在所有误差中,对流层时延误差是最主要的误差来源,需进行更深层次的研究。

参考文献

[1] 杨振起,张永顺,骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
YANG Z Q, ZHANG Y S, LUO Y J. Bistatic (multistatic) radar system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.

[2] 王喜,王更辰. 机-机双基地雷达若干关键技术研究[J]. 电光与控制,2009,16(7):45-48.
WANG X, WANG G C. Critical technologies of bistatic radar onboard airplanes [J]. Electronics Optics & Control,

- 2009, 16(7):45-48.
- [3] 姜军, 张小宽, 李洪兵. 利用共视比对解决雷达网时间同步的方法[J]. 现代雷达, 2009, 31(3):70-72.
JIANG J, ZHANG X K, LI H B. A method for solving the time synchronization problem for radar network using the common view[J]. Modern Radar, 2009, 31(3):70-72.
- [4] PIESTER D, BAUCH A, BREAKIRON L, et al. Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of international atomic time [J]. Metrologia, 2008, 45(2):185-198.
- [5] 张玲. 卫星双向时间比对的数字基带设计[J]. 电讯技术, 2009, 49(10):83-87.
ZHANG L. Digital base-band design of two-way satellite time transfer device[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(10):83-87.
- [6] 张沪玲, 李群续, 赵景磊. 卫星双向对时应用系统设计[J]. 电讯技术, 2012, 52(10):1691-1695.
ZHANG H L, LI Q X, ZHAO J L. Design of a ship-shore time synchronization application system[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(10):1691-1695.
- [7] 王海, 周渭, 刘畅生, 等. 一种新的短时间间隔测量方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(2):267-271.
WANG H, ZHOU W, LIU C S, et al. Novel short time interval measurement method [J]. Journal of Xidian University: Natural Science Edition, 2008, 35(2):267-271.
- [8] 苗苗, 周渭, 李智奇, 等. 用于时间同步的高精度短时间间隔测量方法[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(4):77-80.
MIAO M, ZHOU W, LI Z Q, et al. Application research of high-precision time interval measurement on time synchronization[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(4):77-80.
- [9] 刘利, 韩春好. 卫星双向时间比对及其误差分析[J]. 天文学进展, 2004, 22(3):219-225.
LIU L, HAN C H. Two way satellite time transfer and its error analysis [J]. Progress in Astronomy, 2004, 22(3):219-225.
- [10] 王新龙, 李亚峰. GPS 定位中 4 种对流层延迟修正模型适应性分析[J]. 电光与控制, 2008, 15(11):5-9.
WANG X L, LI Y F. Applicability analysis of four sorts of troposphere delay error models in GPS positioning [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(11):5-9.
- [11] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 导弹航天测量控制系统——GPS 技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
Military training textbook committee of PLA general armament department. Missile aerospace measurement and control systems—GPS technology and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [12] 刘利. 相对论时间比对理论与高精度时间同步技术[D]. 郑州: 信息工程大学, 2004.
LIU L. Relativistic theory of time transfer and techniques of clock synchronization [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004.

下 期 要 目

雷达高分辨距离像的特征提取算法研究
面向协同突防的无人飞行器自动编队控制
美国空军下一代战斗机信息咨询书概要和比较
一种面向机动的航资测量系统设计
固定翼反潜飞机航空自导深弹攻潜效能仿真
基于四元数的垂直发射拦截导弹姿态自抗扰控制

基于相邻像素灰度改正比的遥感图像拼接缝消除
基于滑模与控制分配的六旋翼飞行器容错控制
基于多域分层的机载雷达作战实验系统设计
一种基于突发技术的多信道 MAC 协议
导弹退化故障预测方法研究
大容量机载存储系统设计与仿真评价