

引用格式:顾仁财,刘飞,车敏.一种低资源占用率的战术数据链自主时间同步方法[J].电光与控制,2018,25(8):70-73,83. GU R C, LIU F, CHE M. An autonomous time synchronization method for TDL with low resource consumption rate[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):70-73, 83.

一种低资源占用率的战术数据链自主时间同步方法

顾仁财¹, 刘飞¹, 车敏²

(1. 中国电子科技集团公司第二十研究所,西安 710068; 2. 空军工程大学理学院,西安 710051)

摘要: 针对有限资源下战术数据链自主时间同步问题,设计了一种基于Kalman滤波的时差数据处理算法和一种自适应的校时消息发送策略,有效降低了校时消息的资源占用率。此外,针对时间基准角色转移时造成Kalman滤波器发散的问题,提出一种解决方法,确保了时间同步功能的稳定性。实验与仿真结果证明了所采用方法的有效性。

关键词: 战术数据链; 时间同步; Kalman滤波; 发送策略

中图分类号: V351.36 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.014

An Autonomous Time Synchronization Method for TDL with Low Resource Consumption Rate

GU Ren-cai¹, LIU Fei¹, CHE Min²

(1. The 20th Institute of CETC, Xi'an 710068, China;

2. College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To address the issue of autonomous time synchronization of Tactical Data Link (TDL) under the condition of limited resources, a time-difference data processing algorithm based on Kalman filter and an adaptive RTT message transmission strategy were designed, which effectively reduced the resource consumption rate of RTT messages. In addition, a corresponding solution was proposed for the problem of Kalman filter divergence caused by NTR role transfer, which ensured the stability of the time synchronization function. The experiment and simulation results have proved the effectiveness of the proposed method.

Key words: tactical data link; time synchronization; Kalman filter; transmission strategy

0 引言

多平台协同作战是现代战争的主要形式,高精度时空统一是实现多平台协同作战的重要基础与前提^[1]。基于卫导授时是实现各作战单元时间同步的一种重要手段,然而,在电磁对抗日趋激烈的现代战场中,卫导的可用性难以保证;短波、长波等无线电广播授时作用范围广,但授时精度不高^[2]。以Link16为代表的战术数据链是一种大容量、保密、抗干扰、时分多址的战术信息分发系统,可以将各参战单元连成一个统一的通信网络,以加快情报传递、统一指挥和协同作战,在近几年局部战争中得到了广泛应用,被称为“作战效能倍增器”^[3]。由于战术数据链通常具有很强的抗干扰、抗毁和保密性能,因此,基于数据链而实现的时间同步功

能具有相同的抗干扰、抗毁能力,同步精度可达10~100 ns量级,可有效弥补卫导、长波授时的不足^[4]。

战术数据链时间同步问题涉及端机、网络、消息标准、数据处理等多个方面内容,具有一定的复杂性,受到了广泛关注^[5-9]。校时消息发送频率是影响战术数据链时间同步精度的重要因素,校时消息发送越频繁,时间同步精度越高。然而,战术数据链网络成员众多,而战术通信资源却是有限的,因此,如何在有限资源下实现高精度时间同步是一个值得深入研究的问题。此外,为了确保战术数据链网络的抗毁性,某些重要网络角色通常设有替补角色,那么新旧角色交接时如何确保自主时间同步功能的稳定性同样有待于进一步研究。

1 自主时间同步原理

战术数据链网络时间同步主要通过双向往返校时(RTT)方式实现,无需知道待同步成员和已同步成员的精确位置,避免无线信号在大气传播中的延迟误差,RTT原理如下。

收稿日期:2017-08-25

修回日期:2017-09-30

基金项目:国防基金项目资助课题(1100195)

作者简介:顾仁财(1985—),男,江西上饶人,硕士,工程师,研究方向为数据链时空统一、态势融合技术。

待同步成员(询问端)在其时隙起点处向已同步成员(应答端)发送 RTT 询问消息;已同步成员测量该消息信号到达时间 T_i ,并在固定时刻通过 RTT 应答消息将 T_i 数值发送给待同步成员;待同步成员测量 RTT 应答消息的信号到达时间 T_r ,计算其与已同步成员的时间偏差,如图 1 所示。

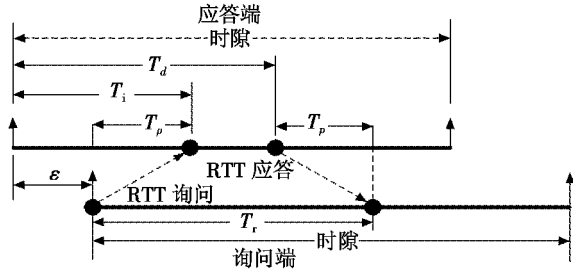


图 1 RTT 原理

Fig. 1 RTT mechanism

图中: T_i 为应答端测出的询问消息到达时间; T_r 为询问端测出的应答消息到达时间; T_d 为 RTT 应答消息的发送时刻; T_p 为 RTT 消息的传播时间; ε 为两个用户之间的时间偏移。由于 $\varepsilon + T_p = T_i$, $T_d + T_p = \varepsilon + T_r$, 因此可得

$$\varepsilon = T_i - T_r + T_d / 2 \quad (1)$$

2 时间同步滤波算法

战术数据链终端的时钟频率稳定度可达 10^{-9} 量级,由于时钟存在老化现象,频率准确度指标会随时间推移变得越来越差,通常低于稳定度指标 1~2 个量级。如果战术数据链时间同步精度指标为 50 ns (1σ),其中时钟漂移分配的误差为 25 ns,那么对于时钟频率准确度为 10^{-7} 的某个网络成员而言,其须以 4 次/s 的频率发送 RTT 消息,则只需要 32 个成员就占有所有的时隙资源。因此,需要利用 Kalman 滤波算法对时钟漂移规律进行滤波、跟踪,基于 Kalman 滤波器的预测值对时钟进行实时修正(如每 100 ms 修正一次),以节省资源。同时, Kalman 滤波器能够有效降低时差测量值中的随机误差,提高时间同步精度。

时间同步状态方程和测量方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X}_k 为 k 时刻系统特征的状态向量; \mathbf{Z}_k 为观测向量; \mathbf{A}_{k-1} 为状态由 $k-1$ 时刻到 k 时刻的转移矩阵; \mathbf{H}_k 为观测矩阵; \mathbf{w}_k 为 k 时刻系统输入随机噪声向量; \mathbf{v}_k 为观测噪声向量。

Kalman 滤波方程如下所述。

1) 初始条件

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{0|0} = \mathbf{X}_0 \\ \mathbf{P}_{0|0} = \mathbf{P}_0 \end{cases} \quad (3)$$

2) 一步预测

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (5)$$

3) 滤波更新

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (8)$$

式(8)中, \mathbf{I} 为单位矩阵。

滤波初始化是时间同步滤波器启动的第一步,理论上只需两次或三次时差测量就可以完成滤波器初始化,然而当 RTT 间隔时间较短、时差测量分辨率不高时,利用前两次或三次的时差测量数据对滤波器进行初始化,可能会导致初始估计结果出现严重偏差,进而导致滤波器失效。因此,为了保证 Kalman 滤波器能够稳定工作、快速收敛,通常需要利用多次(如 9 次)时差测量数据对滤波器初始状态和协方差阵进行估计。

由于实际环境中时差测量可能存在奇异值,为了防止 Kalman 滤波器发散,确保其可靠稳定工作,需要对时差测量值进行合理性判定,将奇异值剔除。时差测量合理性判别准则如下:

$$1) \quad |\varepsilon_k - \hat{\varepsilon}_k| < \gamma_1 \quad (9)$$

$$2) \quad d_k^2 = (\varepsilon_k - \hat{\varepsilon}_k)^T \mathbf{S}_k^{-1} (\varepsilon_k - \hat{\varepsilon}_k) < \gamma_2 \quad (10)$$

式中: ε_k 为时间偏差测量值; $\hat{\varepsilon}_k$ 为时间偏差测量值的预测值; d_k^2 为统计距离; $\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k$; γ_1 为测量值与预测值偏差门限; γ_2 为归一化门限值(一般取 9)。如果连续 9 次时差测量被判定为奇异值,则重启 Kalman 滤波器。

如果 Kalman 滤波器估计的时间偏差为 $\Delta \hat{t}$,则校正的时间为 $\left\lfloor \frac{\Delta \hat{t} + T_u/2}{T_u} \right\rfloor$ (下取整, T_u 为时钟最小修正单位)。每完成一次校时后,滤波器状态变量中的时间偏差重置为 $\text{mod}(\Delta \hat{t} + \frac{T_u}{2}, T_u) - \frac{T_u}{2}$,其他状态和误差协方差矩阵保持不变,转入下一次滤波迭代。

3 RTT 消息发送策略

为了获得更高的时间同步精度,待同步成员总是期望频繁地向时间基准(NTR)做校时。然而,当网络成员较多时,即使所有成员以 12 s 的周期向 NTR 做校时也将占用较多网络资源。因此,本文设计了一种自适应的 RTT 消息发送策略,具体包含以下两个步骤。

1) 对接收到的初始入网消息和精确定位与识别 (PPLI) 消息的时间质量进行审查, 建立或更新 RTT 源选择列表。列表中包含至多 4 个最高时间质量等级的单元, 这些成员的时间质量等级均高于本单元的时间质量等级, 并按照时间质量等级从高到低进行排列。时间质量等级划分如表 1 所示。

表 1 时间质量等级表

Table 1 Time quality scale

时间质量等级	时间误差/ns	时间质量等级	时间方差/ns
15	≤50	7	≤800
14	≤71	6	≤1130
13	≤100	5	≤1600
12	≤141	4	≤2260
11	≤200	3	≤4520
10	≤282	2	≤9040
9	≤400	1	≤18 080
8	≤565	0	> 18 080

如果两个源的时间质量等级相同, 则距离本单元较近者排前面, 如果无法确定源距离本单元的距离, 则最新接收到的源排前面。源选择列表中的每个源包含的信息有序号、源平台编号、时间质量等级、与本单元的距离。

2) 本单元读取源选择列表, 首先选择列表中时间质量等级最高的源作为其准备发送 RTT 询问消息的源, 根据源的时间质量等级计算出时间门限值, 如果本单元当前时间方差超过门限值, 则在可用的时隙向该源发送 RTT 询问消息。如果连续两次询问都未收到来自该源的 RTT 应答消息, 则选择列表中时间质量等级次高的源, 计算相应的时间门限值, 判定是否向该源发送 RTT 询问消息, 持续这个过程直至成功接收 RTT 应答消息或用完列表中的所有源为止。如果接收到 RTT 应答消息或遍历整个源选择列表, 则重新读取源选择列表, 重复本次操作。

计算时间偏差的估计方差门限值为

$$\sigma_{\text{thresh}}^2 = 2 \times 50^2 \times 2^{14 - (S_n - A)} \quad (11)$$

式中: S_n 为源的时间质量等级; $A = 0.5$ 。

战术数据链网络中只有一个成员担任 NTR, NTR 不需要与其他网络成员做 RTT 校时, 所有成员的时间都尽可能向 NTR 的时间对齐。为了提升网络的抗毁性, 战术数据链系统通常设有替补 NTR 这一角色, 当替补 NTR 监测到 NTR 不在当前网络时, 便自动升级成为新的 NTR。需要指出的是, 由于网内其他成员已经与 NTR 建立好了时钟相对漂移规律, 因此, 当替补 NTR 成为新的 NTR 时, 其应保持之前建立的时钟漂移模型继续对本地时钟进行校正, 以确保网络内其他成员的时间能够平稳地向新的 NTR 对齐, 否则, 网络内所有

非 NTR 成员的 Kalman 滤波器都将迅速发散、重启。

4 实验结果与分析

4.1 时差滤波算法

为了验证 Kalman 滤波算法的性能, 在实验室环境下采集待同步数据链终端的时差测量数据 (每 1 s 采集 1 次, 共采集 18 min), 如图 2 所示。

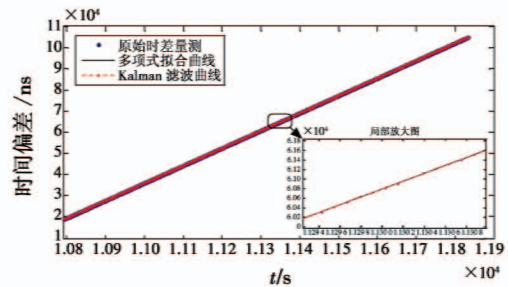


图 2 时差量测与滤波跟踪结果 (滤波周期 $T = 1$ s)

Fig. 2 Time difference measurement and filter tracking results (filtering period $T = 1$ s)

在数据采集过程中, 待同步终端只进行时差测量不修正时钟, 以获得时钟的漂移曲线。从图 2 中可以看出, 在稳定环境下, 时钟漂移曲线近乎为线性的。

对采集的原始时差测量数据进行多项式拟合, 再对前 12 min 的时差测量数据进行 Kalman 滤波, 后 6 min 基于 Kalman 滤波器估计的时钟漂移规律对时间偏差进行预测, 图 3 所示为原始测量误差曲线和滤波误差曲线。

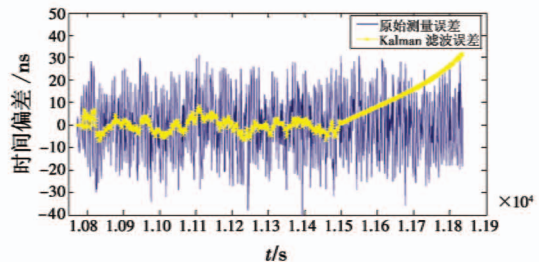


图 3 Kalman 滤波误差曲线 (滤波周期 $T = 1$ s)

Fig. 3 Kalman filtering error curve (filtering period $T = 1$ s)

可以看出, Kalman 滤波器能够有效降低原始时差测量误差, 提高时间同步精度。此外, 经过数据统计分析可得: 时钟漂移速度约为 83 ns/s, 而利用 Kalman 滤波估计的时钟漂移规律对时间偏差进行预测, 6 min 内预测误差不到 40 ns, 即预测误差仅约为 0.1 ns/s, 这充分证明了 Kalman 滤波能够有效提升时钟的守时能力, 降低校时消息的发送频率。

定义滤波增益 = 原始测量误差 / Kalman 滤波估计误差。表 2 显示了不同 RTT 周期下的滤波增益, 从表中可以看出, RTT 周期对滤波器的估计精度有较大的影响, RTT 越频繁, 滤波器估计精度越高, 当 RTT 周期为 12 s 时, 滤波器几乎无法降低测量误差。

表 2 不同 RTT 滤波周期下的滤波增益

Table 2 Filter gains under different RTT filtering periods

RTT 周期/s	滤波增益	RTT 周期/s	滤波增益
1	5.04	6	1.21
3	3.51	12	1.02

4.2 RTT 消息发送策略

为了验证本文 RTT 消息发送策略的有效性,假设战术数据链 T_i 与 T_r 的测量精度均为 30 ns, NTR、替补 NTR、主要用户的时钟性能如表 3 所示。

表 3 不同网络成员的时钟性能

Table 3 Clock performance of different network members

网络成员	时钟指标	
	初始频率偏差	频率短期稳定度
NTR	10^{-8}	10^{-12}
替补 NTR	-5×10^{-8}	10^{-12}
主要用户	10^{-7}	10^{-11}

如果 NTR 在主要用户的视距内,则式(11)中的时间门限值 σ_{thresh}^2 为 3 536.1,主要用户 RTT 消息发送时刻及时差测量值如图 4 所示,经过 Kalman 滤波处理后时间同步精度为 36.5 ns。图 5 给出了相邻两次 RTT 的间隔时间,从图中可以看出,主要用户 RTT 消息发送周期逐渐增大,大约 10 次 RTT 后基本稳定,稳定后的 RTT 周期为 34 s。因此,相比传统 12 s 一次的 RTT 发送频率,本文的 RTT 发送策略可以在维持时间质量等级的前提下,使 RTT 时隙占用率减少 65%。

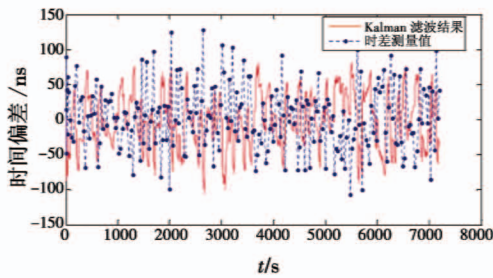


图 4 时差量测与滤波跟踪结果

Fig. 4 Time difference measurement and filter tracking results

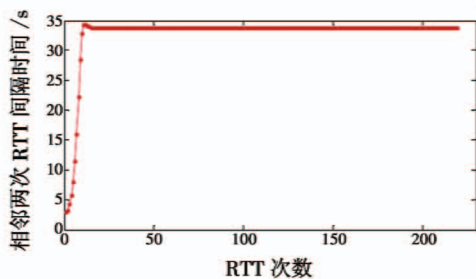


图 5 RTT 消息发送周期

Fig. 5 RTT message transmission period

4.3 NTR 角色转换时的时间同步策略

为了验证本文 NTR 角色转换时的时间同步策略,在 4.2 节仿真条件的基础上,假设前 1800 s,替补 NTR、主要用户均向 NTR 做校时;在第 1800 s 处,NTR 脱网,

替补 NTR 转换为新 NTR,主要用户向新 NTR 做校时。

如果新 NTR 保持原来的漂移模型继续对本地时钟进行修正,则新 NTR、主要用户与旧 NTR 的时间偏差曲线如图 6 所示,图 7 为后 1800 s 主要用户与新 NTR 的时间偏差曲线。

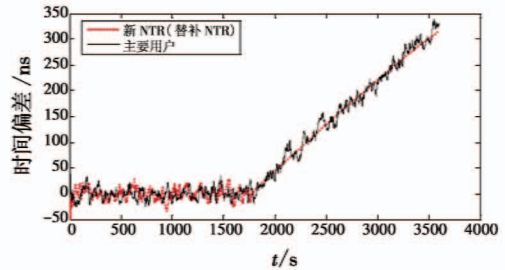


图 6 新 NTR、主要用户与旧 NTR 的时间偏差曲线

Fig. 6 The time offset curve between new NTR, primary user and old NTR

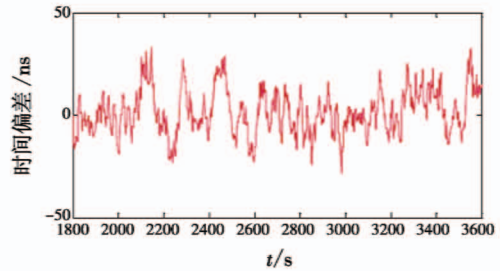


图 7 主要用户与新 NTR 的时间偏差曲线

Fig. 7 The time offset curve between primary user and new NTR

由此可以看出,尽管 NTR 脱网后,新 NTR 和主要用户与旧 NTR 的时间偏差逐渐增大,但主要用户能够迅速实现与新 NTR 的精确时间同步。图 8 显示了两种情形下主要用户时差量测统计距离 d_k^2 值,从图中可以看出,当新 NTR 保持原来的漂移模型继续本地时钟时, d_k^2 值基本在 9.0 以下,不超过式(10)中的门限值;当新 NTR 不再对本地时钟修正,则 d_k^2 值迅速超出门限值,即意味着主要用户 Kalman 滤波器将重新启动。

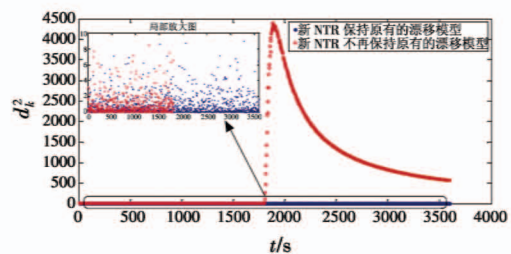


图 8 时差测量统计距离 d_k^2

Fig. 8 d_k^2 of statistic distance of time difference measurements

5 结束语

战术数据链是赢得信息化战争的关键,时空统一精度是影响战术数据链作战效能发挥的重要因素。本

(下转第 83 页)

设置,识别情况难以满足需求。当随机误差减小时,识别正确率较高。

3.3 基于晶振特征识别的快速性

如表 5 所示,对比了几种算法处理同一脉冲流所

需要的时间,明显可以看出,基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别算法所消耗的时间更少,且完成了对重点雷达信号的识别。PRI 搜索法和改进 PRI 变化法只完成了对脉冲的分选。

表 5 1000 次 Monte Carlo 实验的时间统计
Table 5 Time statistics of 1000 Monte Carlo experiments

	基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别								PRI 搜索 算法	改进 PRI 算法		
	相对晶振基本间隔为 8 μs				相对晶振基本间隔为 10 μs							
脉冲流范围	全脉冲	1250 MHz	3750 MHz	2500 MHz	1375 MHz	全脉冲	1000 MHz	1500 MHz	1850 MHz	1300 MHz	全脉冲	全脉冲
共用时/s	1.513 138	0.545 683	0.540 107	0.539 081	0.545 882	0.958 624	0.547 911	0.542 004	0.541 724	0.544 558	2.497 625	5 774.819 985

4 结束语

本文提出利用重点雷达信号的晶振特征对脉冲流进行识别处理,该算法从 PRI 的生成原理着手考虑, PRI 的变化复杂与否对该算法的识别情况影响很小,相对于传统算法, PRI 变化越复杂,该算法的优越性越强,通过与 PRI 搜索法与改进 PRI 变化法进行对比,验证了该算法对复杂雷达信号的处理速度和识别效果都是优于传统方法的,通过增加随机误差亦验证了该算法在实际环境下的可行性。传统的 PRI 处理方法可以实现信号的盲源分离,但实时性和针对性较差。基于前期的雷达对抗情报侦察,能够对给我方产生威胁的雷达信号有一定的了解,能得到想要的雷达晶振特征,满足该算法对脉冲流处理前需要重点雷达信号的晶振特征这个条件。在紧急情况下,需要对重点雷达信号进行快速识别,因此本文具有一定的实际应用价值。

参考文献

[1] 潘继飞,姜秋喜,毕大平. 雷达“指纹”参数选取[J]. 现代防御技术,2007,35(1):71-75.
 [2] 陈晟,姜秋喜,潘继飞. 基于脉间指纹特征的雷达个体识别可行性分析[J]. 电子信息对抗技术,2012,27(3):6-9,77.
 [3] 尹亮,姜秋喜,潘继飞,等. 一种相控阵雷达指纹特征提取技术[J]. 航天电子对抗,2012,28(5):47-49.
 [4] 潘继飞,姜秋喜,毕大平. 恒比触发法在高精度雷达 PRI 测量中的应用[J]. 现代雷达,2007,29(1):64-67.
 [5] 潘继飞,姜秋喜,毕大平. 基于内插采样技术的高精度时间间隔测量方法[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(11):1633-1636.
 [6] 孟祥豪,罗景青,马贤同. 新体制雷达信号 PRI 样本子图周期搜索提取方法[J]. 信号处理,2015,31(4):399-406.
 [7] 曹阳. 基于 PRI 的高密度脉冲信号分选算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

(上接第 73 页)

文分析了战术数据链基于往返校时(RTT)的网络时间同步机制,针对大规模网络情况下 RTT 时隙资源受限的问题,设计了一种基于 Kalman 滤波的时差数据处理算法和一种自适应的 RTT 消息发送策略,可有效降低自主时间同步功能对时隙资源的需求。此外,本文还提出了一种时间同步策略,可以避免 NTR 角色转移时网络各成员 Kalman 滤波器需重启的问题,提高时间同步功能的稳定性。

参考文献

[1] WILSON C. Network centric warfare: background and oversight issues for congress[R]. Washington DC: Congressional Research Service Reports for Congress, 2005.
 [2] 李跃,邱致和. 导航与定位 - 信息化战争的北斗星[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2008.
 [3] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国防

工业出版社,2007.
 [4] FALCHETTI C R, NATHANS D, JONES T E, et al. Enhanced Link-16/GPS/INS navigation robust tactical navigation resource for the military[C]//ION GPS, 2000: 1683-1693.
 [5] 花江. 基于差分 GPS 的战术数据链高精度时间同步[J]. 电讯技术,2016,56(4):389-393.
 [6] 郭强. 协同数据链的高精度时间同步设计[J]. 航空电子技术,2016,47(1):6-10,30.
 [7] 刘继业,陈西宏,刘强,等. 一种双基地雷达时间同步的新方法[J]. 电光与控制,2014,21(4):10-14.
 [8] WU N, WANG H, KUANG J M. Performance analysis and simulation of JTIDS network time synchronization[C]// Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005:836-839.
 [9] 庄晓燕,王厚军. 基于卡尔曼滤波的网络精确时钟同步研究[J]. 测控技术,2013,32(9):107-110.