### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.007

**引用格式:**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. [HUA Jiang. High-precision time synchronization for collaborative tactical data link via differential GPS[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(4):389-393. ]

# 基于差分 GPS 的战术数据链高精度时间同步\*

## 花 江\*\*

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:精确协同作战作为信息化条件下作战形态的必然发展趋势,其对作战平台间高精度时间同步 提出了较高的要求。针对该要求,在分析了战术数据链往返计时(RTT)时间同步算法的基础上,提出 了卫星导航载波相位差分 GPS(DGPS)技术与数据链高精度时间同步算法,利用卡尔曼滤波构建时间 同步计算算法模型,实现高精度的时间同步。仿真结果表明该算法可提高时间同步精度到 3 ns。 关键词:协同作战;战术数据链;时间同步;差分 GPS;往返计时;卡尔曼滤波 中图分类号:TN967 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)04-0389-05

# High-precision Time Synchronization for Collaborative Tactical Data Link via Differential GPS

## HUA Jiang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract**: The precise cooperative combat is an inevitable development trend under the condition of informationization, so high-precision time synchronization is urgently needed between different platforms. By analyzing the round trip time(RTT) clock synchronization algorithm and the differential GPS(DGPS) technology, a time synchronization model is constructed by Kalman-filtering to obtain high-precision time synchronization. Algorithm process is provided and algorithm strategy is simulated. The simulation results show that the precision of time synchronization can be improved to 3 ns.

Key words:cooperative combat;tactical data link;time synchronization;differential GPS;round trip time; Kalman-filtering

# 1 引 言

战术数据链系统可以通过网络通信体系实现战 斗平台之间的实时、高效的数据交换,在战斗平台间 建立网络化、分布式的实时处理机制,以实现对数据 链网络内各战斗参与平台的快速、准确定位和精确 处理控制,并具备高速率、大容量、高实时性、高动态 网络组织以及抗干扰/抗截获/抗摧毁能力。

为了使数据链具备战术态势共享、平台探测以 及战术数据交互的能力,需要数据链载体平台之间 具有高精度的时空配准,其中时间同步精度是决定 数据链各平台能力的重要决定因素。文献[1]提出 了一种兼顾飞机平台内部时间同步和编队时间同步 的方法,误差分析结果表明其实现的平台内部及编 队平台间时间同步精度可达到100 ns。

大多数战术数据链采用往返计时(Round Trip Time, RTT)报文的方法实现平台间时间同步,其同 步精度约为30 ns<sup>[2]</sup>。作战时间精度每提高一个数 量级,其武器效能也会提高一个数量级<sup>[3]</sup>。因此, 在 RTT 基础上研究更高精度的时间同步算法,可以 为提升数据链的作战效能提供更好的支持。

随着卫星导航技术的发展,数据链的载体平台 都集成了以全球定位系统(Global Positioning Sys-

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-10-26;修回日期:2016-03-11 Received date:2015-10-26;Revised date:2016-03-11

<sup>\*\*</sup> 通信作者:15328000188@163.com Corresponding author:15328000188@163.com

tem,GPS)为代表的卫星导航接收机,并将卫星导航 授时作为时间系统的本源<sup>[4]</sup>。本文在传统 RTT 时 间同步法的基础上,结合载波相位差分 GPS(Differential GPS,DGPS)技术,利用卡尔曼(Kalman)滤波 实现观测数据的融合<sup>[5]</sup>,以实现数据链平台间更高 精度的时间同步。

## 2 RTT 时间同步算法

战术数据链通过 RTT 时间同步算法实现数据 链各平台之间的时间信息同步,其时隙划分为询问 时隙和应答时隙<sup>[6]</sup>,具体流程如下:由时间基准平 台发送 RTT 报文,待同步平台接收到 RTT 后,根据 RTT 同步算法调整本地时钟,详细流程如图1所示。



图 1 RTT 算法示意图 Fig. 1 Sketch map of RTT algorithm

其时间同步的过程分为粗同步、精同步与同步 保持三个步骤。

(1) 粗同步

当待同步平台接收到 RTT 数据后,根据 RTT 报 文内容调整本地时钟,初步设定待同步平台的系统 时间为接收时间,RTT 报文中的时间加上所设定的 时间间隔。

(2)精同步

粗同步之后,待同步平台主动发送 RTT,然后等 待时间基准平台的 RTT 响应报文,RTT 的查询和响 应在一个时隙内完成。

 $T_{p} = TOA_{i} - \varepsilon = TOA_{r} + \varepsilon - T_{d}$ 。 (1) 式中: $T_{p}$ 为 RTT 报文的传播时间; $TOA_{i}$ 为 RTT 查询 报文达到时间基准平台的时间; $TOA_{r}$ 为 RTT 返回报 文到达待同步平台的时间; $T_{d}$ 为时隙内固定时延值;  $\varepsilon$ 为两平台时钟源在本次同步之前的时间偏移量。

(3)同步保持

· 390 ·

精同步后同步平台与时间基准平台之间处于时 钟的稳定同步状态,为了维持系统时间的精确同步, 需要监视时钟的性能变化以及精同步过程的保持。 当检测到系统时钟的误差超过了预定门限,需要对 时间同步的过程进行自检和修正,同时重新开始同步流程。

根据算法中 $\varepsilon$ 的精度来确定同步保持的精度, 通过 $\varepsilon$ 修正待同步平台时钟源,本文将精同步之后 仍存在的 $\varepsilon$ 定义为 $\Delta dT_{LRI}$ ,用以描述平台之间的时 间同步偏差的待调整量。

需要指出的是,由于 RTT 时间同步的时间基准 来源于平台的 GPS 接收机授时,在经过 GPS 差分处 理后,可以提供更为精确的时间同步观测量。因此, 可以借助 GPS 差分的时钟钟差测量值以辅助进行 平台间时间同步。

## 3 DGPS 时钟钟差差分

基于载波相位的 DGPS 技术是 GPS 高精度测量 应用的重要组成部分,而动基准站的 DGPS 技术更 是广泛应用于飞机着陆、编队飞行、空中加油等场 景,该技术能够在10 km基线长度内达到厘米级的 相对定位精度。

集成 DGPS 技术的数据链系统可获得平台间高 精度相对位置信息以及包含接收机钟差的观测量信 息,为高精度时间同步提供支撑。

## 3.1 载波相位差分原理

GPS 差分示意图如图 2 所示。在历元 t 时刻, 数据链平台 R 与 L 对卫星 S 的载波相位测量值  $\phi_{R}^{s}$ 、  $\phi_{i}^{s}$ 构成观测方程为<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} \lambda \phi_{\rm R}^{\rm S} = \rho_{\rm R}^{\rm S} + c \left( dT_{\rm R} - dt^{\rm S} \right) - \lambda N_{\rm R}^{\rm S} - d_{\rm R\_ion}^{\rm S} + d_{\rm R\_trop}^{\rm S} + \varepsilon \left( \phi_{\rm R} \right) \\ \lambda \phi_{\rm L}^{\rm S} = \rho_{\rm L}^{\rm S} + c \left( dT_{\rm L} - dt^{\rm S} \right) - \lambda N_{\rm L}^{\rm S} - d_{\rm L\_ion}^{\rm S} + d_{\rm L\_trop}^{\rm S} + \varepsilon \left( \phi_{\rm L} \right)^{\circ} \end{cases}$$

$$\tag{2}$$

式中: $\rho_{\rm R}^{\rm s}$ 和 $\rho_{\rm L}^{\rm s}$ 分别为平台 R 和 L 到卫星 S 的的几 何距离;c为光速; $dT_{\rm R}$ 和 $dT_{\rm L}$ 分别为平台 R 和 L 的 接收机钟差; $dt^{\rm s}$ 为卫星 S 钟差; $N_{\rm R}^{\rm s}$ 和 $N_{\rm L}^{\rm s}$ 分别为平 台 R 和 L 的整周模糊度; $d_{\rm R,ion}^{\rm s}$ 和 $d_{\rm L,ion}^{\rm s}$ 分别为平台 R 和 L 的电离层延时; $d_{\rm R,trop}^{\rm s}$ 和 $d_{\rm L,trop}^{\rm s}$ 分别为平台 R 和 L 的对流层延时; $\varepsilon(\phi_{\rm R})$ 和 $\varepsilon(\phi_{\rm L})$ 分别为平台 R 和 L 的测量噪声。



图 2 GPS 差分示意图 Fig. 2 Sketch map of DGPS

当平台 R 与 L 相距10 km以内时,对流层延迟 和电离层延迟残差经差分后可忽略不计,根据式 (2)得到单差载波相位方程为

 $\lambda \Delta \phi_{LR}^{s} = \Delta \rho_{LR}^{s} - c \Delta dT_{LR} - \lambda \Delta N_{LR}^{s} + \Delta \varepsilon(\phi_{LR})$ 。(3) 同理,在平台 R 与 L 共同观测卫星 J 时,可得到 针对卫星 J 的单差载波相位方程为

$$\lambda \Delta \varphi_{\rm LR}^{\rm J} = \Delta \rho_{\rm LR}^{\rm J} - c \Delta dT_{\rm LR} - \lambda \Delta N_{\rm LR}^{\rm J} + \Delta \varepsilon (\phi_{\rm LR})_{\circ} \quad (4)$$

以卫星 S 为参考基准,忽略载波相位测量噪声, 平台 R 与 L 的双差载波相位方程为

$$\lambda \nabla \Delta \phi_{LR}^{JS} = \lambda \left( \Delta \phi_{LR}^{J} - \Delta \phi_{LR}^{S} \right) = \left( \Delta \rho_{LR}^{J} - \Delta \rho_{LR}^{S} \right) - \lambda \left( \Delta N_{LR}^{J} - \Delta N_{LR}^{S} \right) = \nabla \Delta \rho_{LR}^{JS} - \lambda \nabla \Delta N_{LR}^{JS}$$
(5)

3.2 钟差差分观测方程

在两个数据链平台同时观测 5 颗以上 GPS 卫 星的前提下,可以得到至少 4 组载波相位双差观测 方程,联立得到矩阵方程式。利用 LAMBDA 等方法 对该矩阵方程式进行解算,求解得到双差整周模糊 度 $\nabla \Delta N_{LR}^{IS}$ 的准确值,进而计算平台 R 与 L 的准确相 对位置( $\delta x, \delta y, \delta z$ )。

在单差载波相位观测方程中仍保留有平台间的 接收机钟差差分项 ΔdT<sub>LR</sub>,其描述了两个接收机各 自时钟与标准时间在信号采样时刻的相对差值,所 以在获得差分项 ΔdT<sub>LR</sub>具体值后,即能得到两个接 收机之间的时钟具体差值。

因此,在获得双差载波相位解算结果的基础上 进行单差载波相位方程的变换,得到两平台接收机 之间的钟差差分值:

$$\Delta dT_{\rm LR} = \Delta \rho_{\rm LR}^{\rm S} - \lambda \Delta N_{\rm LR}^{\rm S} + \Delta \varepsilon (\phi_{\rm LR}) - \lambda \Delta \phi_{\rm LR}^{\rm S} \approx \Delta \rho_{\rm LR}^{\rm S} - \lambda \Delta N_{\rm LR}^{\rm S} - \lambda \Delta \phi_{\rm LR}^{\rm S} = (l_x^{\rm S} \cdot \delta x + l_y^{\rm S} \cdot \delta y + l_z^{\rm S} \cdot \delta z) - \lambda \Delta N_{\rm LR}^{\rm S} - \lambda \Delta \phi_{\rm LR}^{\rm S} \circ$$
(6)

式中: $(l_x^s, l_y^s, l_z^s)$ 表示 L 平台与卫星 S 的法向余弦分量; $(l_x^s \cdot \delta x + l_y^s \cdot \delta y + l_z^s \cdot \delta z)$ 与  $\Delta \phi_{LR}^s$ 为已知值,在卫 星跟踪信号连续的情况下  $\Delta N_{LR}^s$ 为固定值。

### 3.3 钟差差分项时变量

根据 3.2 节的分析,接收机钟差差分项  $\Delta dT_{\rm LR}$ 是与  $\Delta N_{\rm LR}^{\rm s}$ 紧密结合的未知量,而要求解  $\Delta N_{\rm LR}^{\rm s}$ 的具 体数值,需要精密星历和精确的基准站位置信息,而 这在数据链平台应用上是无法保障的。动态性与实 时处理的要求使得  $\Delta N_{\rm LR}^{\rm s}$ 的求解困难重重并且误差 不可计量,因此在  $\Delta N_{\rm LR}^{\rm s}$ 未知的情况下,无法获得  $\Delta dT_{\rm LR}$ 的准确数值。

但在信号锁定稳定的前提下, $\Delta N_{LR}^{s}$ 具备前后历 元不变的特性,可以获得前后历元  $\Delta dT_{LR}$ 的变化量  $\nabla \Delta dT_{LR}$ 的计算公式,并将 $\nabla \Delta dT_{LR}$ 命名为钟差差分项 时变量。

$$\nabla \Delta dT_{\text{LR}} = \Delta dT_{\text{LR}}(t+1) - \Delta dT_{\text{LR}}(t) = \left[ \left( l_x^{\text{S}} \cdot \delta x + l_y^{\text{S}} \cdot \delta y + l_z^{\text{S}} \cdot \delta z \right) / c - \lambda \Delta \phi_{\text{LR}}^{\text{S}} / c \right]_{t+1} - \left[ \left( l_x^{\text{S}} \cdot \delta x + l_y^{\text{S}} \cdot \delta y + l_z^{\text{S}} \cdot \delta z \right) / c - \lambda \Delta \phi_{\text{LR}}^{\text{S}} / c \right]_{t} \right]_{t}$$

$$(7)$$

## 4 Kalman 滤波时间同步算法

由于数据链时间基准平台的时钟与标准 GPS 时钟存在一定误差,为进一步提高时间同步精度,可 将数据链平台经 RTT 时间同步校准之后残差(待调 整量)用单差 GPS 的钟差量表征,这样即可融合 RTT 校准与差分 GPS 信息。

#### 4.1 滤波模型

如图 3 所示,以 GPS 接收机输出的秒脉冲为基 准,通过 RTT 校时的方式获得平台 R 与 L 之间的秒 脉冲时间差值  $\Delta dT_{LR1}$ ,同时通过载波相位差分算法 获得平台之间秒脉冲相对应的时钟钟差差分值  $\nabla \Delta dT_{LR0}$ 



图 3 平台间秒脉冲对比图 Fig. 3 Comparison diagram of pulses per second of different platform

假设平台 R 为时间基准,那么在 k 时刻 L 的秒 脉冲与 R 的秒脉冲之间存在的客观时间差与时间 差变化率构成状态变量 X(k),与 k-1 时刻的状态 变量 X(k-1)之间关系描述为状态方程:

 $\boldsymbol{X}(k) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(k-1) + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{t}(k-1)_{\circ}$ (8)

式中: $X = \begin{bmatrix} dT & dT \end{bmatrix}^{T}$ , dT 为经过 RTT 精校准之后的 时间偏差值, dT 为该偏差值的变化率; 状态转移矩 阵  $A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\Delta T$  为 RTT 更新间隔时间;  $\delta t = \begin{bmatrix} dT_{-\delta}, dT_{-\delta} \end{bmatrix}^{T}$ ,  $dT_{-\delta}$  为  $\Delta T$  时间内平台时钟的钟漂 变化导致的时间偏差,  $dT_{-\delta}$  为该时间偏差的一阶导 数变化量,由于在  $\Delta T$  时间内  $dT_{\delta}$  取值远小于1 ns 且  $dT_{\delta}$  短时间内平稳分布,可将  $\delta t$  作为高斯噪声 序列处理,协方差矩阵为  $Q_{\circ}$ 

从观测数据上分析,利用 RTT 进行时间调节的 调整量  $\Delta dT_{LR1}(k)$  和 DGPS 测量值 $\nabla \Delta dT_{LR}(k)$  构成 观测向量  $\mathbf{Z}(k)$ ,即

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \Delta t_{LR}(k) & \Delta i_{LR}(k) \end{bmatrix}^{T}$$
(9)  

$$\exists \Psi : \Delta t_{LR}(k) \exists k \wedge f f f f RTT \forall \theta \theta \psi z = \delta d T_{LR}(k) \\ \exists k \psi \Delta d T_{LR}(k) \\ \exists \lambda d T_{LR}(k) \\ \exists$$

将公式(8)与公式(9)联立,建立如式(10)所示 的状态空间模型:

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}(k+1) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(k) + \boldsymbol{I}\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{t}(k) \\ \boldsymbol{Z}(k) = \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}(k) + \boldsymbol{\zeta}(k) \end{cases}$$
(10)

式中: $H = I_{2x2}$ 表示观测矩阵; $\zeta(k)$ 表示服从正态分布的高斯噪声; $\Gamma = I_{2x2}$ 为高斯噪声系数矩阵。基于此状态空间模型,采用 Kalman 滤波<sup>[8]</sup>递推估计 RTT 精同步之后仍存在的同步偏差,以进一步提高数据 链平台之间的时间同步精度。

#### 4.2 滤波模型稳定性分析

若 RTT 更新间隔  $\Delta T$  使得 {A, H} 是可观测的, 并且过程噪声协方差矩阵 Q 使得 { $A, Q^{-1/2}$ } 在单位 圆周上可控,那么状态 X(k)的 Kalman 递推估计误 差协方差矩阵收敛<sup>[8]</sup>。

由于

$$\sum_{l=0}^{n-1} \mathbf{A}^{l} \boldsymbol{\Pi}^{\mathrm{T}} (\mathbf{A}^{l})^{\mathrm{T}} > 0 \qquad (10)$$

满足判决条件,所以滤波模型为一致完全可控的。 式中:n为状态变量的维数。

同理,由于

$$\sum_{l=0}^{n-1} \boldsymbol{A}^{l} \boldsymbol{H} \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{A}^{l})^{\mathrm{T}} > 0$$
 (11)

成立,因此滤波模型为一致完全可测的。由滤波稳定 性定理可知<sup>[9]</sup>,该 Kalman 滤波器是一致渐进稳定的。

# 5 算法仿真验证与分析

## 5.1 算法仿真机理

基于数据链的通信与 RTT 能力,在融合校时偏 差与 DGPS 的 RTCM 协议处理后,利用 Kalman 滤波 融合 RTT 的校时量与 DGPS 的钟差时变量信息,得 到最优时频调整量,由此设计整体算法仿真验证的 机理如图 4 所示。



图 4 算法验证机理 Fig. 4 The frame of algorithm assessment

Kalman 滤波时间同步算法流程图如图 5 所示。 同步平台分别获取了基准平台和同步平台的秒脉冲 和载波相位观测值后,按照 RTT 时频调整方法获得 调整量  $\Delta dT_{LR1}(k)$ ,同时根据 DGPS 的载波相位观测 量与差分定位结果采用式(7)解算出 $\nabla \Delta dT_{LR}(k)$ ,然 后基于状态空间模型式(10)经过 Kalman 滤波融合 后即可进行同步平台的时频调整。





#### 5.2 实验结果分析

假设 RTT 时间同步处理时,采样时钟频率为典型值100 MHz。结合某战术数据链提供的技术指标, $\Delta dT_{LRI}$ 的误差小于30 ns,在进行时间对齐调整后,会有10 ns为粒度的秒脉冲时差跳跃量。初始钟差为50 ns,初始钟漂为 $2 \times 10^{-12}$  Hz,滤波采样间隔为1 s,仿真时间设定为200 s。

在上述仿真条件下,采用单独 RTT 时间同步法 进行时钟同步调整与真实时间偏差的误差仿真结果 如图 6 所示,与战术数据链提供的时间同步精度指

· 392 ·



Fig. 6 RTT time synchronization errors

而 $\nabla \Delta dT_{LR}$ 的误差值取决于 DGPS 的位置误差 和载波相位测量误差,综合折算后确认误差小于 2 ns。依据第4节设计的 Kalman 滤波模型及算法 流程进行平台间秒脉冲时间差的融合计算,融合滤 波结果如图7 所示。根据滤波结果,以融合滤波得 到的时间偏差估计值进行时频调整,Kalman 滤波融 合后的平台间时钟同步误差如图8 所示。



Fig. 7 Time errors estimation after Kalman filtering



图 8 融合滤波后的时钟同步误差 Fig. 8 Time synchronization errors after Kalman filtering

图 8 的仿真结果表明:数据链平台间采用本文 所提算法进行融合滤波后,同步平台在经过 20 个历 元的收敛时间后,时间同步偏差稳定在3 ns以内,极 大地提高了数据链平台的时间同步精度。

## 6 结束语

本文提出了战术数据链平台之间利用 Kalman 滤波融合 GPS 钟差差分项时变量与 RTT 时间同步 差值,实现平台间高精度时间同步的方法。仿真验 证表明,该方法时间同步精度可达到3 ns,相对传统 的数据链时间同步方法,时间同步精度大大提高。

此外,在数据链的实际应用场景中,算法处理时 延、信号传播、信道延迟不确定性等都将对纳秒级同 步精度造成影响,需要从算法或实现层面进行相对 应的时延补偿,以实现同步精度的保持。

## 参考文献:

- [1] 段求辉. 航电系统高精度时间同步方案[J]. 电讯技术,2014,54(6):830-834.
  DUAN Qiuhui. Ahigh precision time synchronization scheme for avionics system[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(6):830-834. (in Chinese)
  [2] 田雨,战术数据链网络同步技术的一种改进算法[J].
- [2] 田雨. 战术数据链网络同步技术的一种改进算法[J]. 指挥控制与仿真,2013,35(5):27-29.
   TIAN Yu. Animproving network synchronization algorithm for tactical data-link[J]. Command Control & Simulation,2013,35(5):27-29. (in Chinese)
- [3] 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.
  LI Yue, QIU Zhihe. Navigation and positioning-beidou navigation system in information battle[M]. 2nd ed. Beijing:National Defense Industry Press,2008. (in Chinese)
  [4] 张守信, GPS 技术与应用[M].北京:国防工业出版
- [4] 张守信. GPS 技术与应用[M]. 北京:国防工业出版 社,2004.
   ZHANG Shouxin. GPS technology and application[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2009. (in Chinese)
- [5] 秦永元,张洪钺,汪淑华. Kalman 滤波与组合导航原 理[M].西安:西北工业大学出版社,2003. QIN Yongyuan,ZHANG Hongyue,WANG Shuhua. Kalman filer and integrated navigation principle[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2003. (in Chinese)
- [6] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国 防工业出版社,2007.
   MEI Wenhua, CAI Shanfa. JTIDS/Link16 data link[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2007. (in Chinese)
- [7] 张旭. GPS 载波相位定位算法研究与仿真[D]. 哈尔 滨:哈尔滨工程大学,2007.
   ZHANG Xu. GPS carrier phase relative positioning algorithm and simulation[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2007. (in Chinese)
- [8] KAILATH T, SAYED A H, HASSIBI B. Linear estimation [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000.
- [9] 付梦印, 邓志红, 闫莉萍. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社,2010. FU Mengyin, DENG Zhihong, YAN Liping. Kalman filter theory and its application in navigation system[M]. Beijing; Science Press, 2010. (in Chinese)

### 作者简介:



**花** 江(1973—),男,四川成都人,1996 年获通信工程专业学士学位,现为高级工程 师,主要研究方向为航空通信技术等。

HUA Jiang was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1973. He received the M. S. degree on communication engineering in 1996. He is now a senior engineer. His research concerns aeronautical communication.

Email:15328000188@163.com