

天地一体化信息网络高速传输协议设计与若干关键技术研究

班亚明, 郑浩, 刘喆, 董思洋

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要:为了解决天地一体化信息网络中高丢包率、高误码率、大延时等问题,通过对可靠UDP、SCPS-TP等协议的研究,设计并实现适用于天地一体化信息网络的高速传输协议(SRTP)。SRTP重新设计了ACK和NAK相结合的确认机制、数据包重传机制,并利用人工免疫算法(IA)优化基于PID的拥塞控制机制。对比试验表明,SRTP与传统TCP相比,在传输速率、网络稳定性等方面均有良好的效果。

关键词:天地一体化信息网络;数据传输;PID控制;网络拥塞;人工免疫算法

中图分类号: TN939

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021047

Research on Key Technologies and Design of High-speed Transmission Protocol in Space-Integrated-Ground Information Network

Ban Yaming, Zheng Hao, Liu Zhe, Dong Siyang

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: In order to solve the problems of high packet loss rate, high bit error rate and long delay in space-integrated-ground information network, a transmission protocol (SRTP), which was based on UDP and SCPS-TP was designed. In SRTP, ACK and NAK acknowledgement mechanism, packet retransmission mechanism were redesigned, and PID congestion control mechanism was optimized based on artificial immune network algorithm (IA). Compared with traditional TCP, SRTP has better effect on transmission rate and network stability.

Keywords: space-integrated-ground information network, data transmission, PID control, network congestion, artificial immune algorithm

1 引言

现在被广泛应用的TCP/IP传输协议,可为用户提供可靠数据传输功能,但TCP是基于字节流的,要求具有丢包检测、报文顺序保证,这样会导致其传输速度较慢,建立连接时间和资源开销较多^[1]。因此在天地一体化信息网络中,该协议是低效的、不合适的^[2]。相对于传统TCP,Google提出的QUIC协议引入了许多新的特性,从而在理论上拥有比TCP更好的性能。QUIC协议不仅具有更短的网页加载时间、更小的握手时延,而且在安全性方面它使用比TLS1.2^[3]更加安全的加密传输协议TLS1.3^[4]。另外,空间数据系统咨询委员会(CCSDS)针对空间传输环境和特性修改和扩展TCP/IP协议栈,制定网络协议SCPS-

NP (Network Protocol)^[5]、安全协议 SCPS-SP (Secure Protocol)^[6]、传输协议 SCPS-TP (Transport Protocol)^[7]和文件协议SCPS-FP (File Protocol)^[8],但是这些协议在使用方式上需要根据实际使用情况优化。

2 天地一体化文件传输要求

卫星与信关站之间数据传输协议不仅要求占用资源少,而且必须能够提供较为可靠的传输服务。具体分析如下。

(1) 传输可靠性

传输协议需要兼顾各种硬件平台的可靠性与性能,具备良好的兼容性,占用资源少,能够具备长期稳定、高效运行的能力;协议需要适用于无线网络环境下的

多路全双工工作场景，应具备自适应各类网络环境的能力；协议需要可靠传输，支持根据网络时延、丢包率、可用带宽自动调整通信参数。

(2) 支持大文件传输

传输协议栈需要对空间链路应用场景进行优化和分层设计，通过将单个文件进行切分及逻辑分卷，达到支持大文件传输的目的。

(3) 带宽利用率

针对卫星空间链路带宽设计，在512 kbit/s~2.5 Mbit/s卫星链路环境中进行小文件传输时，平均传输速率不低于带宽的60%；进行大文件传输时，平均传输速率不低于带宽的70%。

3 融合多协议优势的SRTP协议结构设计

传统TCP传输速率慢，占用系统开销大，无法满足卫星通信传输环境要求；用户数据报协议（User Datagram Protocol, UDP）是不可靠传输，在天地一体化传输过程中经常因为信道质量不稳定等因素导致丢包率比较高，也不适用于卫星与信关站之间的数据传输；SCPS-TP

对于卫星链路特点定制了多项策略，改善了端到端数据传输性能，但其拥塞控制策略是保守的Vegas算法和Van Jacobson算法，在卫星链路环境下的传输速率性能不及TCPW、TCP Hybla和增强型TCPW（Enhanced TCPW, E-TCPW）方法，因而SCPS-TP的卫星链路传输性能有待进一步提高^[13-14]。

通过吸纳UDP、SCPS-TP等协议优点，设计适用于天地一体化空间链路的数据传输协议（SRTP）。

(1) 协议栈结构

SRTP摒弃SCPS-TP的三段连接法，直接在两个端机之间维护一条SRTP连接，避免协议转换卫星网关的开发和维护，大大降低复杂度，提高连接传输能力。SRTP应用连接示意及协议栈结构如图1所示。

(2) 协议帧结构设计

SRTP结构在UDP设计基础上，定义10个字节的协议头，包括数据类型标识（2字节）、网络分片序号（2字节）、缓存分片序号（2字节）、容错信息（2字节）、数据大小信息（2字节），如图2所示。

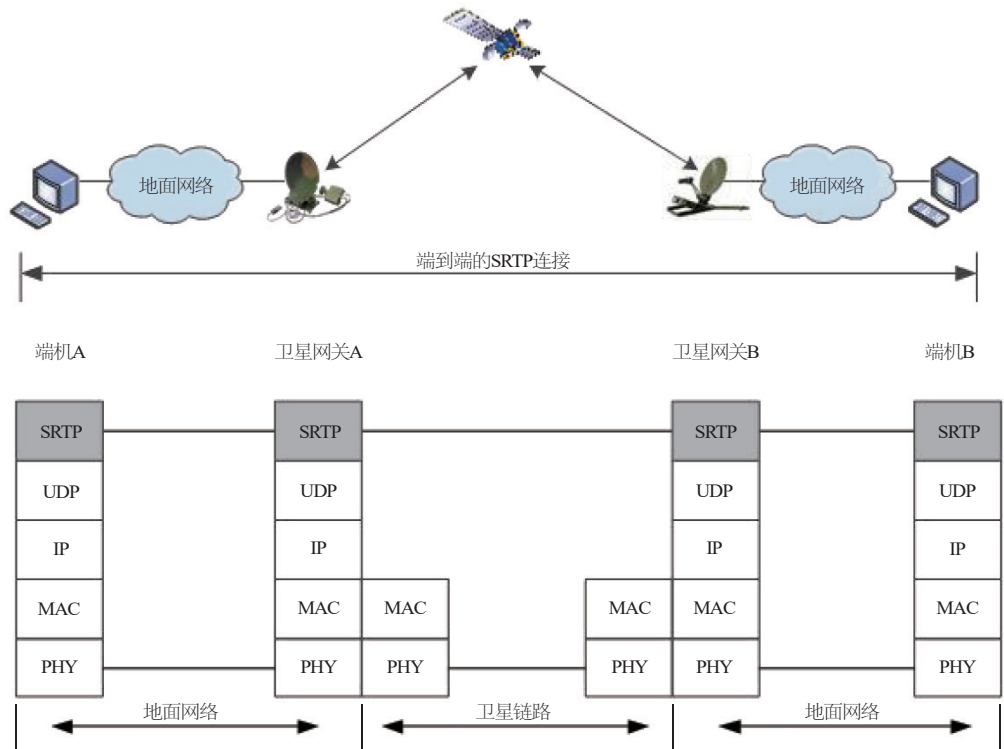


图1 SRTP应用连接示意及协议栈结构



图2 SRTP帧结构

图2所示的帧结构中,各部分含义见表1。

表1 SRTP帧结构各部分含义

内容	含义
数据类型	可选内容包括:文件信息包、指令信息包、普通数据块、文件数据结束包和通道检测包等
网络分片序号	是该数据包在缓存分片中的顺序与缓存分片长度的内积,表明该数据包在缓存分片中的顺序信息
缓存分片序号	是该缓存分片在文件中的顺序与文件长度的内积,表明该数据包在文件中的顺序信息
容错	可选类型包括:首次连接失败、最新收到报文序号、无断开连接信息等
数据大小	数据总大小的哈希值,用于校验数据的完整性
数据块	指普通数据内容,根据经验SRTP每个包总长度初始值可设为975字节,因此每个包最大可携带数据大小为965字节

(3) 协议基本原则

SRTP是基于UDP设计的,为了能够有效地保证可靠传输,设计如下原则:

- ①根据网络类型及网络状况,将一个文件分为多个缓存分片,一个缓存分片分为多个网络分片,逐一传输;
- ②引入滑动窗口机制,包括发送窗口和接收窗口;
- ③开始传输之前,发送方需要首先向接收方发送一个确认包,接收方回传一个确认接收数据包,发送方才能开始接收普通数据块;
- ④开始发送之后,发送方不需要等待接收方的确认包,就可以将数据陆续发送出去;
- ⑤当接收方收到数据包后,会根据“报文文件相对位置”及“报文序号”将该数据包写入文件,收到分组结束包后接收方会查看是否收到该分组内所有的数据,是则开始下一个分组的传送,否则查找缺失的数据包序号并通知发送方重新发送;
- ⑥利用定时产生的通道检测报文判断网络是否断开。当断开时,发送方不再发送数据,并通知用户网络情况以做出相应的动作。

4 SRTP若干关键协议机制研究

为了实现基于UDP的可靠传输,SRTP设计了相关配合机制,如ACK(肯定确认)和NAK(否定确认)相结合的确认机制、前向纠错机制、带宽预分配机制、基于PID的拥塞控制机制、平滑流量机制、反向专线控制链路机制等。以下就其中几个关键机制进行分析。

4.1 ACK和NAK相结合的确认机制

按照空间链路特点,SRTP采用了ACK和NAK相结合的确认机制,这样有助于减少反向链路的确认数据量,降低数据包重传的响应时间,提升整体传输效率,如图3所示。

(1) 分层设计:SRTP将一个待发送的完整文件分割为若干缓存分片(图3中CACHE 0~CACHE N),同时将每个分片在传输过程中又被划分为若干个网络分片(编号0~ n)。

(2) 设计原则:SRTP针对缓存分片采用ACK机制,而针对网络分片采用NAK机制。

(3) 定时器:发送端不需要启动任何定时器,接收端需要分别启动接收定时器和超时定时器。当接收端接收到一个新的缓存分片后开始计时,直至收到属于该缓存分片的网络分片序号大于最大值的一半时,停止计时并启动定时器,定时器超时时间设置为前半部分缓存分片的接收时长乘以保护系数。

(4) 正常情况:当完成一个缓存分片的接收后,接收端向发送端回复ACK消息告知缓存分片接收成功,发送端接收到ACK消息后从内存中清除CACHE 0,并回复接收ACK成功通知。

(5) 异常情形

情景1:缓存分片CACHE 0的网络分片0在传输过程中丢失时,接收端收到网络分片1后,即可判定网络分片0已丢失,立刻向对端发送NAK消息请求发送端重新发送

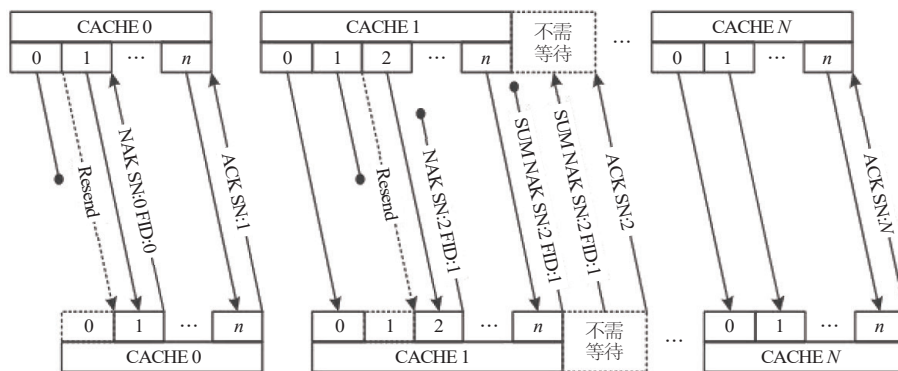


图3 SRTP协议确认机制示意

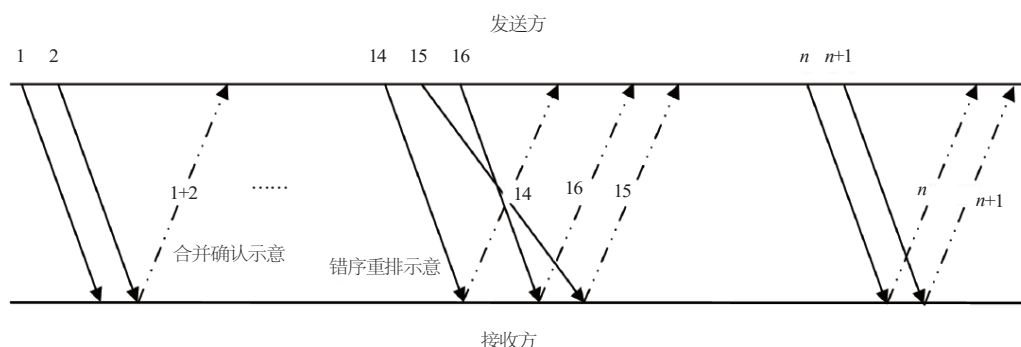


图4 在实际网络环境中传输数据分片帧有可能发生的各种情况

网络分片0，发送端接收到NAK消息后重传网络分片0。

情景2：如果ACK消息或接收ACK成功通知发生丢失，则接收端会定时重传ACK消息，直至收到接收ACK成功通知为止。

情景3：接收端检测到缓存分片CACHE 1的网络分片1丢失后，向发送端回复的NAK消息也发生了丢失，则接收端在接收到下一个缓存分片CACHE 2的网络分片或超过预设时间门限后，会向发送端周期性发送NAK汇总消息，其中携带CACHE 1中缺失的网络分片明细，直至接收端集齐全部缺失网络分片。

情形4：接收端启动超时定时器后，后续如果缓存分片完整接收，则取消定时器；如果缓存分片未完整接收，且收到了下一个新的缓存分片或定时器超时，则触发定时器并开始周期性发送NAK汇总消息，直至缓存分片集齐为止。

4.2 数据包的合并确认与重传机制

SRTP在发送数据时需要先将较大的数据包分片并依次发出，对端接收到数据分片帧后写入缓存进行组包操作，并回复数据接收确认帧。考虑到在复杂网络环境中数据分片帧的传输会发生“乱序”和“丢包”现象，情况就会变得比较复杂。图4显示了在实际网络环境中传输数据分片帧有可能发生的各种情况。

(1) 错序重排

图4中序号为14、15和16三个数据分片帧并未按照发送顺序抵达接收方（接收方收到的数据帧如图5所示），SRTP在每次接收到数据分片帧后，可以根据“网络分片序号”“缓存分片序号”进行错序重排，然后重新组包。

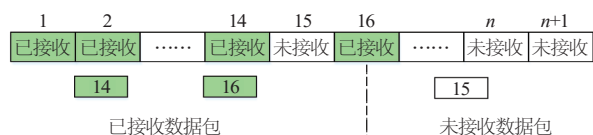


图5 接收方收到的数据帧

接收端在接收到相应序号数据包之前，先将数据包位置设为“未接收”；发送过程中，不断有数据分片到来，如图5中14、16数据分片陆续到达后，接收端将动态数组中14、16置为“已接收”。当数据分片出现错序时，该协议可以动态检测并将其放在合适数据包数组位置。只有当该数据包完整凑出之后，协议才将其提交到应用层。

(2) 自动重传

当传输过程中丢包发生时，需要由发送方启动超时重传线程，自动补发数据分片帧。

SRTP中，设定补发时间间隔与补发次数平方成正比的关系，如下所示

$$\text{resendInterval} = C + \text{resendNum}^2 \quad (1)$$

式中，resendInterval为补发时间间隔，resendNum为补发次数，C为常量，不同网络终端值不同。

(3) 合并确认

SRTP中，接收方可根据网络情况暂缓回复数据分片帧，并且可将回复的数据分片帧合并发送。此处根据经验一次性发送最多50个数据分片帧，当数据分片帧的接收足够“密集”时，合并确认技术就会被启用。这样既不会造成难以忍受的确认时延又可以最大限度地节省对反向带宽的占用。

4.3 基于PID-IA的拥塞控制设计

为了进一步优化SRTP，本文对其拥塞控制进行重新设计。首先，推导SRTP中的拥塞控制流体模型；然后，引入PID控制策略，并给出PID的拥塞控制过程模型以及公式；最后，引入人工免疫算法（IA），以对PID控制器的各个参数进行组合优化。

4.3.1 拥塞控制流体模型

SRTP设计研究中，拥塞控制过程（记为cp）主要包括终端及信道类型Chtp、对终端的空闲缓存探知Tics、信道质量Cqcr等因素协调控制。该过程可表示为

$$\text{cp} = \{\text{Chtp}, \text{Tics}, \text{Cqcr}\} \quad (2)$$

上述控制方式不仅考虑信道质量问题，也关注链路类型（空间、地面）、终端类型等因素，可操作性强。

(1) 信道质量

结合SRTP流体控制模型，UDP数据流可用如下非线性微分方程来描述

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = \frac{1}{\frac{q(t)}{C(t)} + T_p} - \frac{w(t)}{2} \cdot \frac{w(t-R(t))}{\frac{q(t-R(t))}{C(t)} + T_p} \cdot p(t-R(t)) & (3) \\ \dot{q}(t) = \begin{cases} -C(t) + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C(t)} + T_p} w(t), & \text{当 } q(t) > 0 \text{ 时} \\ \max \left\{ 0, -C(t) + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C(t)} + T_p} w(t) \right\}, & \text{当 } q(t) = 0 \text{ 时} \end{cases} & (4) \end{cases}$$

其中， $w(t)$ 为流的窗口大小； $q(t)$ 为瞬时瓶颈队列长度； T_p 为传播时延； $R=q/C+T_p$ ，为传输数据包往返时延（Round-Trip Time, RTT）； $C(t)$ 为链路容量； N 为连接数量； p 为丢包概率。

(2) 终端及信道类型Chtp

常用的卫星空间链路终端包括TDMA、FDMA，不同类型终端的编码方式、有效信息载荷等均不相同。

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = C_1 + C_2 \dot{w}(t) & (5) \\ \dot{q}(t) = C_3 \dot{q}(t) & (6) \end{cases}$$

其中， C_1 、 C_2 、 C_3 为常数，针对不同终端及信道各取不同的经验值，具体见表2。

表2 不同终端及信道取值

类型	C_1 取值	C_2 取值	C_3 取值
TDMA	21.3	0.7	0.76
FDMA	29	0.8	0.83

(3) 对终端的空闲缓存探知Tics

针对不同终端类型，SRTP可以主动获取终端中当前可用的空闲缓存数量，从而据此调整发送速率，确保终端的物理缓存中始终存在数量合理的待发送数据。这样既避免网络拥塞（缓存溢出）导致的丢包，又保证终端始终以最大能力发送数据，拥有极高的带宽利用率。

不同终端可给出如下经验公式

$$\dot{w}(t) = WN - \dot{w}(t) \quad (7)$$

4.3.2 基于PID拥塞控制机制

在流体模型基础上，引入了PID控制策略，其拥塞控

制过程cp可表示为

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = WN - C_1 + C_2 \left(\frac{1}{\frac{q(t)}{C(t)} + T_p} - \frac{w(t)}{2} \cdot \frac{w(t-R(t))}{\frac{q(t-R(t))}{C(t)} + T_p} \cdot p(t-R(t)) \right) & (8) \\ \dot{q}(t) = \begin{cases} C_3 \left(-C(t) + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C(t)} + T_p} w(t) \right), & \text{当 } q(t) > 0 \text{ 时} \\ \max \left\{ 0, C_3 \left(-C(t) + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C(t)} + T_p} w(t) \right) \right\}, & \text{当 } q(t) = 0 \text{ 时} \end{cases} & (9) \end{cases}$$

式(8)阐明拥塞窗口大小的调整机制，描述窗口控制动态特性；式(9)表示瓶颈队列长度，描述队列随时间的变化机制，其中 $0 \leq p \leq 1$ ， $q \in [0, WN]$ 。

为了进一步简化公式，在工作点 (ω_0, q_0, p_0) 时，可假设卫星空间链路信道中链路容量 $C(t)$ 、连接数目 N 均为常数，忽略时延 $t-R(t)$ 对队列长度 q 的相关性，假设它的值固定为 $t-R_0$ ，保留动态参数往返时间对队列长度的相关性。式(8)、式(9)可简化为

$$\begin{cases} 2(C_1 - WN)(q_0 + CT_p) = CC_2(2 - w_0^2 p_0) & (10) \\ w_0 = \frac{R_0 C}{N}; R_0 = \frac{q_0}{C} + T_p & (11) \end{cases}$$

参考HOLLOT等^[15-16]分析TCP流的方法，在平衡点附近用小信号模型分析法，上述微分方程线性化模型框图如图6所示。

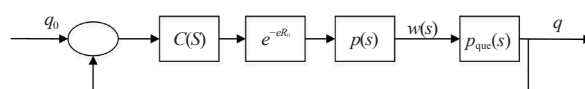


图6 微分方程线性化模型框图

其中， $C(S)$ 表示控制策略， $p(s)$ 表示窗口传递函数， $p_{\text{que}}(s)$ 表示长度变化的传递函数， e^{-sR_0} 表示动态模型的时滞部分，并且它们之间有如下关系

$$p(s) = \frac{\frac{R_0 C^2}{2N^2}}{S + \frac{R_0^2 C}{R_0}}, p_{\text{que}} = \frac{\frac{N}{R_0}}{S + \frac{1}{R_0}} \quad (12)$$

4.3.3 基于PID-1A的网络拥塞控制

在对PID网络拥塞控制研究基础上，本文使用人工免疫算法对PID控制器的各个参数进行组合优化。

SRTP控制系统结构框图如图7所示。

针对图7系统框图，PID控制的离散、增量形式分别如下所述。

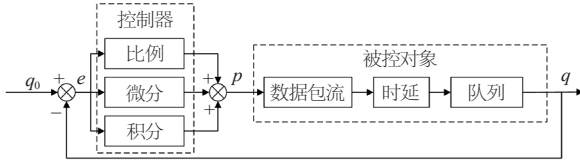


图7 SRTP控制系统结构框图

(1) PID控制规则离散形式

$$p(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_j e(j) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (13)$$

其中, $e(k)=q(k)-q_0$ 表示队列长度的控制偏差变量瞬时值; $q(k)$ 是第 k 时刻队列长度采样值; q_0 为期望队列长度; $p(k)$ 为 k 时刻的丢包率; T 为整体采样时间。

(2) PID控制规则增量形式

$$\Delta p(k) = k_p \left[e(k) \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) - e(k-1) \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) + e(k-2) \frac{T_d}{T} \right] \quad (14)$$

其中, $T_i = k_p / k_i$, $T_d = k_d / k_p$, T 为整体采样时间。

(3) 解空间及性能指标函数

结合SRTP工作环境, 可做如下假设。

k_p 、 k_i 、 k_d 的搜索空间为 Ω

$$\begin{cases} k_p \in (0 \ 500) \\ k_i \in (0 \ 500) \\ k_d \in (0 \ 500) \end{cases} \quad (15)$$

为了使得阶跃响应的控制误差趋近于0, 并且具有较快的响应速度和较小的响应误差, 可以选用误差绝对值时间积分性能指标作为性能指标函数。

$$J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 t_u \quad (16)$$

$$J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |y_E(t)|) dt + w_3 t_u \quad (17)$$

式中, $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制器输出, t_u 为上升时间, w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为权值, $y_E(t) = y_{out}(t) - y_{out}(t-1)$, $y_{out}(t)$ 为被控对象输出。式(16)为未超调性能指标, 式(17)为产生超调时的性能指标。

(4) 基于人工免疫算法的PID参数整定

①免疫算法优化思路

首先, 借助Jerren的独特性免疫网络理论^[17], 模拟生物体中抗原、免疫细胞运动规律形成类免疫算法; 然后, 在更新免疫细胞种群时, 将其分为子群A与B, A中保留适配度高的免疫细胞, B中为适配度低免疫细胞。针对B中免疫细胞进行交叉、变异, 这样有助于得到更多样

化的免疫细胞。

②系统基本假设

系统入侵抗原不唯一, 第 i 个抗原的坐标为 $x_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$, 最终能够与 x_i 匹配的免疫细胞群为 $Y_i = (y_1^i, y_2^i, \dots, y_n^i)$, 其中 $y_q = (y_1^q, y_2^q, \dots, y_n^q)$, $y_q \in Y_i$ 。

免疫细胞 y_q 的运动速度为 $\vec{v}_q = C_1 \times \vec{v}_q + C_2 \times \vec{d}(y_q)$, C_1 、 C_2 分别为原方向、受到细胞因子网络影响的随机干扰。

免疫细胞 y_q 在细胞因子浓度影响下产生速度的微分形式为 $\nabla d(y_q) / \nabla t = G / \|x_i, y_q\|^2$, G 为常量, $\|x_i, y_q\|^2$ 为 x_i 与 y_q 之间的Euclidean距离。

抗原 x_i 与免疫细胞 y_q 之间的结合强度即它们之间的匹配度 $F(x_i, y_q) = 1/J$ (抗原 x_i 中编码了 k_p 、 k_i 、 k_d 数值, 将其带入计算)。

免疫细胞 v 与 w 的空间接近程度为 $\|v, w\|$ (Euclidean距离), 抗原 x 与它们的匹配程度分别为 Ax_v 和 Ax_w , 若 $\|v, w\|$ 与 $|Ax_v - Ax_w|$ 均足够小则 v 与 w 为相似免疫细胞, 且免疫细胞浓度计为 $C_v = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k A c_{v,w}$, $A c_{v,w} = \begin{cases} 1, & \text{当 } v, w \text{ 为相似免疫细胞时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

③算法流程描述

算法流程如图8所示。

•算法初始化

初始化免疫细胞群大小为 M , 免疫细胞记忆库, 设定亲和力和浓度阈值, 最大增殖次数达到MAX。

针对已经形成的抗原种群, 判别系统是否曾经求解过PID参数解, 如有则从记忆细胞库中搜寻该类问题的记忆免疫细胞, 否则随机产生初始免疫细胞。

•免疫细胞运动及免疫更新操作

当有细胞因子网络影响时, 免疫细胞向抗原浓度高的方向移动; 当没有细胞因子网络影响时, 免疫细胞随机产生运动; 且运动之前, 需要将一定的免疫细胞进行变异、交叉等操作。

•免疫细胞的分化、增殖

由免疫细胞不断地进行分化、增殖, 在免疫调节机制下, 免疫细胞群体不断更新进化, 最终消灭抗原, 即搜索到问题的解, 实现与抗原的匹配, 直至最大增殖次数达到MAX为止。

•抗体间产生的刺激与抑制

为了保证免疫细胞的多样性, 免疫细胞的增殖会受到免疫细胞与抗原之间的亲和力以及免疫细胞本身浓度的制约。与抗原亲和力高的免疫细胞会受到促进, 相反, 浓度高的免疫细胞之间会相互抑制。免疫细胞是否需要增殖则需要通过计算亲和力和浓度两个值来确定。

5 原型系统功能验证

5.1 原型功能实现

借助于现有的卫星通信系统，利用SRTP搭建适用于空间链路的文件传输系统。系统运行在申威SW421 CPU+深度操作系统（Linux）环境中，利用C++语言和Qt应用程序开发实现。

在系统中，不同站点之间可以通过SRTP进行文件、短报文消息的传递。

5.2 效率验证

为了对SRTP进行检测，可以借助现有的卫星通信系统，在射频环境下与传统TCP进行效率对比。为了方便对比，本文利用FTP软件进行对比测试（FTP是构建在TCP之上的文件传输协议）。

（1）文件传输效率对比

为了验证SRTP传输效率，本文将文件传输系统区分

为不包含业务逻辑、包含业务逻辑两种，分别与FTP软件进行实验对比。

其中，文件传输系统（不含业务逻辑）是指仅仅使用SRTP传输文件，去除加解密环节以及各种业务约束；文件传输系统（含业务逻辑）是指按照用户要求，增加保密安全、业务逻辑等要求，会牺牲部分传输速率。测试结果对比见表3。

对比不同测试环境的结果，可以得出如下结论：

- 在不同空间链路网络环境下，SRTP均比FTP传输速率快；
- 相比于小带宽网络环境，SRTP在大带宽网络环境中传输速率更快；
- 在同等网络环境中，SRTP在传输大文件时速率更快。

（2）算法收敛性比较

为了测试算法效率，将SRTP算法与人工免疫算法进

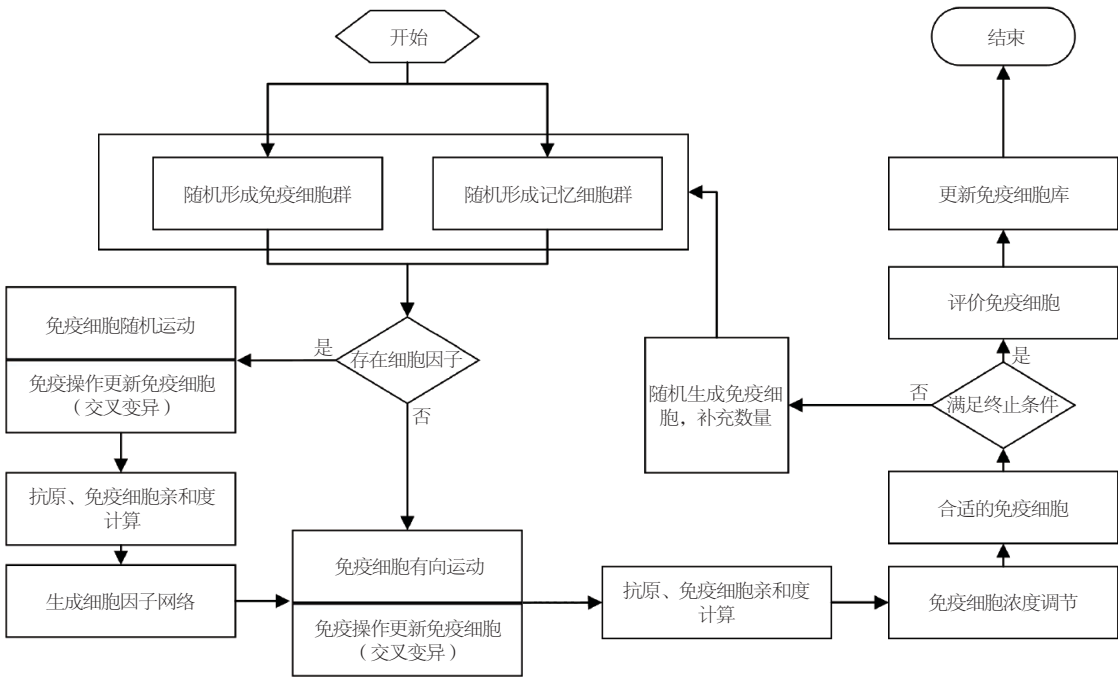


图8 算法流程

表3 文件传输效率对比测试结果

文件大小	文件传输系统 (不含业务逻辑)	文件传输系统 (含业务逻辑)	FTP	测试环境
1.61 MB	耗时37.5 s; 速度351.70 kbit/s	耗时47 s; 速度280.61 kbit/s	耗时42 s; 速度314.03 kbit/s	TDMA终端 512 kbit/s带宽
3.02 MB	耗时60 s; 速度412.33 kbit/s	耗时85 s; 速度291.05 kbit/s	耗时68 s; 速度363.82 kbit/s	TDMA终端 512 kbit/s带宽
6.96 MB	耗时36 s; 速度1 583.78 kbit/s	耗时45 s; 速度1 267.02 kbit/s	耗时43 s; 速度1 325.96 kbit/s	TDMA终端 2 048 kbit/s带宽
97.38 MB	耗时498 s; 速度1 599.50 kbit/s	耗时651 s; 速度1 225.40 kbit/s	耗时601 s; 速度1 327.08 kbit/s	TDMA终端 2 048 kbit/s带宽

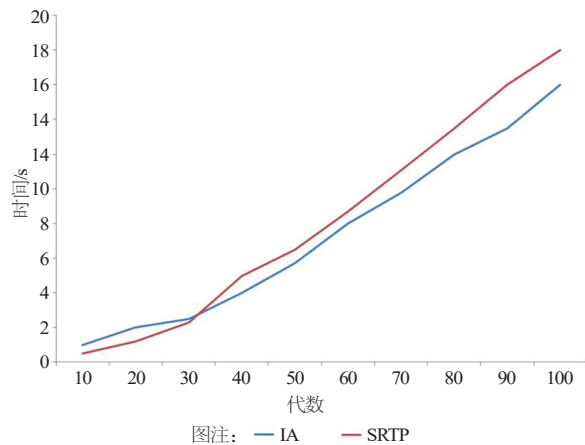


图9 收敛速度比较

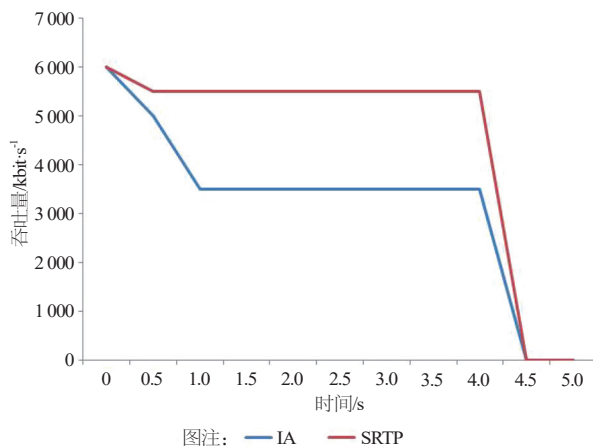


图10 链路吞吐量比较

行比较,收敛速度如图9所示。

图9比较了人工免疫算法、SRTP拥塞控制算法对网络拥塞进行优化所需要的时间。IA算法早期收敛速度较快,但后期收敛速度明显劣于SRTP算法,并且收敛到一定精度后无法继续优化,有可能收敛于局部最优解。SRTP算法增强了全局寻优能力,加快收敛速度,同时还能保证多样性特点。

(3) 链路吞吐量比较

图10表示采用人工免疫算法及本文SRTP算法的链路吞吐量比较,经对比可发现,后者比前者更加平滑,即优化后的网络资源分布更加合理,闲置现象可以得到有效遏制,可提高链路吞吐量。

参考文献：

[1] 张恺. 基于UDP的可靠文件传输协议的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

ZHANG K. Design and implementation of a reliable UDP-based file transfer protocol[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.

[2] BHASIN K B, ANTHONY W, et al. Lunar relay satellite network for space exploration: architecture, technologies and challenges[C]//24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC). [S.L.:s.n.], 2006.

[3] DIERKS T, RESCORLA E. The transport layer security (TLS) protocol version 1.2: RFC 5246[S]. 2008.

[4] RESCORLA E. The transport layer security (TLS) protocol version 1.3: RFC 8446[S].2018.

[5] Space communications protocol specification (SCPS)-network protocol, CCSDS 713.0-B-1, Blue Book[Z].1999.

[6] Space communications protocol specification (SCPS)-security protocol, CCSDS 713.5-B-1, Blue Book[Z].1999.

[7] Space communications protocol specification (SCPS)-transport protocol, CCSDS 714.0-B-2, Blue Book[Z]. 2006.

[8] Space communications protocol specification (SCPS)-file protocol, CCSDS 7170-B-1, Blue Book[Z].1999.

[9] KAKHKI A M, JERO S, CHOFFNES D, et al. Taking along look at QUIC[C]//Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference. NewYork: ACM, 2017: 290-303.

[10] DAS S R. Evaluation of QUIC on Web page performance[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2014.

[11] 伍文平, 王小兵, 唐一禄. Xmodem协议分析与Windows CE平台实现[J]. 电脑知识与技术, 2008,4(2):382-385.

WU W P, WANG X B, TANG Y L. The analysis of Xmodem protocol and implement on Windows CE platform[J]. Computer Knowledge and Technology, 2008, 4(2): 382-385.

[12] 田峰. 通信协议的一种改进方案[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 59-61.

TIAN F. An improved scheme of KERMIT communication Protocol[J]. Journal of Jiangnan University, 2003,31(1): 59-61.

[13] CAINI C, FIRRINCIELI R. End-to-end TCP enhancements performance on satellite links[C]//Proceedings of 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06). Piscataway: IEEE Press, 2006: 1031-1036.

[14] THAVALLYER, ROKSANAB, GOLAM S, et al. Data acceleration and reduction technology[C]//Satellite and Space Communications (IWSSC 2009). [S.L.: s.n.], 2009: 429-433

[15] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. A control theoretic analysis of RED[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications.Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213). Piscataway: IEEE Press, 2001: 1510-1519.

- [16] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No. 01CH37213). Piscataway: IEEE Press, 2001: 1726-1734.
- [17] 董思洋. 支持设计的制造知识类免疫推送技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- DONG S Y. Research on the technology of manufacturing knowledge active push for design based on immune[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [18] MISRA V, GONG W B, TOWSLEY D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2000, 30(4): 151-160.
- [19] ZHANG H, ZHU H T, XIA Y, et al. Performance analysis of BBR congestion control protocol based on NS3[C]//Proceedings of 2019 Seventh International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD). Piscataway: IEEE Press, 2019: 363-368.
- [20] KANAGARATHINAM M R, SINGH S, SANDEEP I, et al. D-TCP: dynamic TCP congestion control algorithm for next

generation mobile networks[C]//Proceedings of 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Piscataway: IEEE Press, 2018.

- [21] 周杨. 基于Reno算法的网络流量优化控制技术的改进研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- ZHOU Y. Research on traffic optimization control technology in the network based on the Reno algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[作者简介]



班亚明（1984-），男，硕士，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星通信与信息传输。

郑浩（1988-），男，硕士，中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师，主要研究方向为卫星通信与信息传输。

刘喆（1993-），男，硕士，中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师，主要研究方向为卫星通信与信息传输。

董思洋（1983-），男，博士，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星通信与信息传输。