

# 基于纠缠的选择自动重传量子同步通信协议\*

周南润<sup>†</sup> 曾宾阳 王立军 龚黎华

(南昌大学电子信息工程系, 南昌 330031)

(2009 年 4 月 29 日收到; 2009 年 8 月 15 日收到修改稿)

分析经典选择重传自动请求重传 (automatic repeat-request, ARQ) 协议之后, 利用量子力学中纠缠态的非定域关联性, 提出了数据链路层的选择重传 ARQ 量子同步通信协议. 该协议把链路分为准备阶段和发送阶段. 在线路准备阶段完成 EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 关联对的分发, 建立量子信道; 在发送阶段完成数据帧和量子确认帧的传送. 从吞吐量和信道利用率等方面比较分析了儿种常见的数据链路层通信协议的性能. 研究表明, 该协议可以有效地提高数据链路层的最大吞吐量和信道利用率, 改善选择重传 ARQ 协议的性能, 在受时间瓶颈限制的通信中有着重要的应用价值.

**关键词:** 量子通信, 量子纠缠, 选择自动重传协议, 同步通信

**PACC:** 0367, 0365, 4250

## 1. 引 言

量子通信是利用量子态编码和携带信息, 进行信息加工、处理、传输和提取的通信方式. 量子通信在理论和实验上都取得重大进展<sup>[1-13]</sup>. 2004 年, BBN 公司、Harvard 大学和 Boston 大学合作实现了世界上第一个量子通信网络<sup>[8]</sup>, 保证了传输过程中数据的绝对安全性. 2008 年, 欧盟赞助的 SECOQC 计划把数个量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD) 连接器件集成在一起, 将几个分布在奥地利的西门子公司连接成一个量子网络, 以实现安全的长距离量子密钥分发<sup>[9]</sup>. 王金东等采用偏振短脉冲相干光源和双 FM 差分密钥分配方案, 实现了稳定的低噪声自由空间量子密钥分发实验, 为空间量子保密通信提供了一个有价值的实施方案<sup>[10]</sup>. 曾和平等<sup>[11]</sup>利用光子计数分析光纤中的偏振变化情况并通过反馈控制的方式进行补偿, 实现了基于 BB84 协议的偏振编码长时间稳定的长距离 (100 km) 量子密钥分发实验. 文献<sup>[12]</sup>提出了一个随机多通道方案, 有效解决了部分可信中继网络中量子密钥分发的致命性安全问题. 2009 年, Long 等<sup>[13]</sup>提出利用校验与功率插入 (inspection and power insertion,

IPI) 技术来延长量子安全直接通信的距离, 并证明所需的资源为距离的多项式函数. 文献<sup>[14-17]</sup>对量子加密算法进行了研究, 能对经典数据和量子比特进行有效保护. 2001 年, Gisin 等<sup>[18]</sup>提出了一种在经典情况下被证明是无法解决的 Byzantine 问题的量子解决方案. 量子时钟同步可以按指数提高精度, 能有效减少同步所需的传输次数<sup>[19, 20]</sup>. 2003 年, Long 等<sup>[21]</sup>利用共享纠缠量子比特提出了同时进行时间和空间方向同步的量子方案. 2006 年, 文献<sup>[22]</sup>利用量子力学中 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 关联对的非定域关联性以及量子远程通信, 设计了一个量子同步通信协议, 它的信道包括不可靠信道和通过在不可靠信道上传输 EPR 粒子而建立的可靠的、“无形”的 EPR 量子纠缠信道, 有效地解决了两军问题. 文献<sup>[23]</sup>提出了一种基于纠缠的数据链路层量子通信协议, 改善了停止等待协议的性能, 在时间起关键作用的通信过程中该协议能发挥明显优势. 停止等待协议中信道的利用率不高, 而且当传播时延很大时, 停止等待协议不实用. 选择重传自动请求重传 (automatic repeat-request, ARQ) 通信协议可以适当地克服这些缺点, 但需要在接收方设置具有相当容量的缓存空间, 增加了成本. 随着存储单元的大幅下降和硬盘容量的巨幅扩

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10647133)、江西省自然科学基金 (批准号: 2007GQS1906, 2009GQS0080)、江西省教育厅科技项目 (批准号: 赣教技字 [2007] 22)、南昌大学引进人才科研启动费和江西省研究生创新专项资金项目 (批准号: YC08A026) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: znr21@163.com

增,缓存空间将不会成为制约选择重传 ARQ 通信协议推广的障碍.目前尚无关于选择重传 ARQ 通信协议的量子改进方法的研究,本文利用量子力学中纠缠态的非定域关联性和量子信息传输的瞬时性,提出一种基于数据链路层的选择重传 ARQ 量子同步通信协议,并对该协议性能进行分析.

## 2. 选择重传 ARQ 通信协议

选择重传 ARQ 通信协议是建立在连续 ARQ 通信协议的基础之上.在连续 ARQ 通信协议中,当发送方发送完一个数据帧后,不是停止发送并等待确认帧,而是连续发送若干个数据帧.如果发送方在此过程中又收到了接收方发来的确认帧,那么还可以接着发送数据帧.这样减少了等待时间,提高了信道传输效率,但当传输过程中有数据帧出错时,出错帧之后传送的数据帧要全部重传.而选择重传 ARQ 通信协议只重传出错帧和超时的数据帧,避免重传那些本来就已经正确到达接收方的数据帧,减少重传的帧数,缩短了传输时间,提高了信道利用率.

对于数据链路层的选择重传 ARQ 通信协议,假设待传送的数据帧串包含了  $M$  个数据帧,每个数据帧在传输过程中出错及丢失的概率均为  $p$ .设每个数据帧的发送时延为  $t_a$ ,数据帧沿链路从发送方 A 到接收方 B 的传播时延为  $t_p$ ,接收方 B 接收数据帧所需的处理时间为  $t_{pr}$ ,接收方 B 发送确认帧 ACK 的发送时延为  $t_b$ ,传播时延为  $t_p$ ,假设发送方 A 处理确认帧的时间也是  $t_{pr}$ .由于数据是连续发送,存在数据帧之间传输时间的重叠,假设时间重叠系数为  $\beta_1$ ,  $0 \leq \beta_1 < 1$ ,重叠时间为  $\beta_1 t_f$ .当  $\beta_1 = 0$  时,则重叠时间为零,也就是说只发送一个数据帧,这时相当于停止等待 ARQ 协议.由于数据帧的发送有先后顺序,数据帧间的发送时间不可能完全重叠,也就是说  $\beta_1$  不可能等于 1.若不考虑时间重叠,则成功发送一个数据帧所需的时间  $t_f$  为

$$\begin{aligned} t_f &= t_a + t_p + t_{pr} + t_b + t_p + t_{pr} \\ &= t_a + t_b + 2t_p + 2t_{pr}. \end{aligned} \quad (1)$$

若考虑时间重叠,则成功发送一个数据帧所需的时间  $t$  为

$$t = t_f - \beta_1 t_f. \quad (2)$$

假设序号为  $M(S)$  的数据帧在传送过程中出错,那么发送方 A 只需重传序号为  $M(S)$  的数据帧,而不必重传那些已经被接收方 B 正确接收的数据帧,则发

送完包含  $M$  个数据帧的数据帧串所需时间为

$$T = Mt + Mt \sum_{i=1}^{\infty} p^i. \quad (3)$$

不难得出,在选择重传 ARQ 通信协议的情况下,正确传送一个数据帧所需的平均时间为

$$t_{av} = \frac{T}{M} = \frac{t_f(1 - \beta_1)}{1 - p}. \quad (4)$$

在发送方处于饱和状态下,最大吞吐量和用时间  $t_f$  进行归一化的吞吐量  $\rho_1$  分别为

$$\lambda_{\max 1} = 1/t_{av} = \frac{1 - p}{t_f(1 - \beta_1)}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_1 = \lambda t_f &\leq \lambda_{\max 1} t_f = \frac{1 - p}{1 - \beta_1} \\ (1 > \beta_1 &\geq 0). \end{aligned} \quad (6)$$

从(5)式可以看出,对于特定的数据链路,在数据帧传输时出错或丢失的概率保持不变的情况下,要提高数据链路的最大信息吞吐量,只有最大可能地减少时间  $t$ ,也就是成功发送一个数据帧所需的平均时间.

假设发送方工作在饱和状态下的发送速率为每秒发送  $\lambda_{\max 1}$  帧,每个数据帧长为  $l_f$  (比特),其中数据长度为  $l_d$  (比特),控制信息长度为  $l_h$  (比特).由(5)式可求出平均有效数据率  $D$  为

$$D = \lambda_{\max 1} l_d = \frac{1 - p}{t_f(1 - \beta_1)} l_d. \quad (7)$$

令  $t_f = l_f/C = (l_d + l_h)/C$ ,其中  $C$  为链路带宽,则可得选择重传 ARQ 协议下的信道利用率  $U_1$  为

$$U_1 = \frac{D}{C} = \left( \frac{l_d}{l_d + l_h} \right) \frac{1 - p}{1 - \beta_1}. \quad (8)$$

由(8)式可知,要提高信道的利用率,在数据帧出错或丢失的概率和数据帧格式保持不变的情况下,就要设法增大  $\beta_1$  的值.

## 3. 选择重传 ARQ 量子同步通信协议

本文把链路分为准备阶段和发送阶段.在链路准备阶段完成 EPR 关联对的分发,建立量子信道;在发送阶段,数据帧由经典链路传送,量子确认帧由量子信道发送.利用量子信息在特定情况下传输可以不需要时间这一特性<sup>[24]</sup>,通过在量子信道中发送确认帧(或否认帧),可以缩短传输时间,进而提高链路的最大吞吐量和信道利用率.假如量子确认信息(或否认信息)不会出错,并且量子确认帧(或否认帧)是有编号的,量子确认帧(或否认帧)的发

送与接收都是按顺序执行; 如果出错, 则把出错帧所对应的数据重传. 选择重传 ARQ 量子同步通信协议允许预先共享经典信息(或量子信息), 但是要求在传输过程中少交换或者不交换经典信息以保证性能优于经典选择重传 ARQ 通信协议. 这就要求在预先共享部分经典信息(或量子信息)的情况下能区分若干量子态(允许破坏区分和重复传送相同量子信息的备份), 或者要求区分量子态和辅助经典通信相结合. 下面分别介绍叠加态、纠缠态和编码态作确认帧的三种确认方式.

### 3.1. 叠加态作确认帧

叠加态作确认帧即共享量子信息的确认方式, 通信双方约定各量子确认帧处于不同的量子态  $|\varphi\rangle_m = a_m|0\rangle + b_m|1\rangle$  ( $m$  为接收方收到的数据帧序号, 满足  $|a_m|^2 + |b_m|^2 = 1$ ), 发方和收方在链路准备阶段所共享的 EPR 关联对始终处于纠缠态  $|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$ . 收方发送确认信息时, 制备多粒子处于不同的确认帧量子态  $|\varphi\rangle_m$ , 并采用可识别 Bell 基  $|\psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$  和  $|\phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)$  的装置对新制备的粒子  $|\varphi\rangle_m$  和预先共享的一个粒子进行联合测量, 有

$$\begin{aligned} |\varphi\rangle_m \otimes |\psi^-\rangle &= \frac{1}{2} [ |\psi^-\rangle (-a_m|0\rangle - b_m|1\rangle) \\ &+ |\psi^+\rangle (-a_m|0\rangle + b_m|1\rangle) \\ &+ |\phi^-\rangle (b_m|0\rangle + a_m|1\rangle) \\ &+ |\phi^+\rangle (-b_m|0\rangle + a_m|1\rangle) ]. \end{aligned} \quad (9a)$$

到了设定的测量时间  $\tau$ , 发方测量与收方相关联的纠缠粒子, 如果收方发出了确认帧, 则发方粒子所处量子态必定为  $-a_m|0\rangle \pm b_m|1\rangle$  和  $\pm b_m|0\rangle + a_m|1\rangle$  之一, 出现的概率是  $1/4$ . 当发方测量所得的结果是上述 4 个状态中的一个时, 表明收方已正确接收数据, 继续发送数据帧; 如果收方没发出量子确认帧, 发方所测量结果是  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  中的一个, 出现的概率为  $1/2$ , 此时记下未发回的确认帧序号, 稍后重新发送. 发方每次测量的结果是 6 个量子态  $-a_m|0\rangle \pm b_m|1\rangle, \pm b_m|0\rangle + a_m|1\rangle, |0\rangle$  和  $|1\rangle$  中的一个, 在允许破坏量子态的前提下, 区分这 6 个量子态是可行的, 并不违反量子不可克隆定理<sup>[23, 25]</sup>,

这里的区分可以是破坏性区分, 而且允许传送多个  $|\varphi\rangle_m$  确认同一帧. 如果信道发送成功的概率大于发送失败的概率, 那么我们可以针对发送失败的帧发送否认帧, 要求重传相应帧; 对发送成功的数据不发回确认帧, 这样可以节省局域量子操作.

### 3.2. 纠缠态作确认帧

纠缠态作确认帧属于共享量子信息辅以经典通信的确认方式, 发送方和接收方在准备阶段共享量子纠缠态  $|\zeta\rangle = \frac{2}{\sqrt{5}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{5}}|11\rangle$ , 每接收一个数据帧, 则测量一对纠缠态,  $|0\rangle$  表示正确接收,  $|1\rangle$  表示错误接收, 双方测量结果均为  $|0\rangle$  的概率为  $\frac{4}{5}$ , 双方测量结果均为  $|1\rangle$  的概率为  $\frac{1}{5}$ . 如果错误接收而双方测量结果为  $|0\rangle$ , 则需要通过其他手段通知发送方重传. 如果正确接收而双方测量结果为  $|1\rangle$ , 则需要通过其他手段通知发送方不要重传. 这里所指的其他手段可以通过经典通信实现. 假设链路成功的概率大于出错及丢失的概率  $p$ , 即  $1 - p > p$ , 则平均而言, 通过量子与经典通信相结合的手段成功发送一个数据帧所需增加时间为  $[\frac{1}{5}(1 - p) + \frac{4}{5}p]t_p = [\frac{1}{5} + \frac{3}{5}p]t_p < \frac{1}{2}t_p$ . 换言之, 采用这种量子与经典相结合的方式, 并不能节省  $t_p$  的时间, 而只能节省时间  $(\frac{4}{5} - \frac{3}{5}p)t_p > \frac{1}{2}t_p$ . 调整  $|\zeta\rangle$  的系数, 可以调整所能节省的时间  $t$ . 当  $p < \frac{1}{2}$ , 且  $|\zeta\rangle$  中同时处于  $|0\rangle$  的概率大于同时处于  $|1\rangle$  的概率, 所能节省的时间  $t$  满足关系  $\frac{1}{2}t_p < t < (1 - p)t_p$ . 这在时间非常紧要的通信中还是有意义的.

### 3.3. 编码态作确认帧

如果链路成功的概率大, 则只发回否认帧. 设  $m$  为接收方收到的数据帧序号, 将  $m$  转换为二进制表示, 并用编码态  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  分别对应 0 和 1, 则通信双方约定量子确认帧处于不同的量子直积态, 如  $m = 3$ , 则  $|\varphi\rangle_m = |1\rangle \otimes |0\rangle$ , 发方 Alice 和收方 Bob 在链路准备阶段所共享的 EPR 关联对始终处于纠缠态  $|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$ . 收方 Bob 发送确认

信息时,制备多粒子处于不同的确认帧量子态  $|\varphi\rangle_m$ , 利用量子隐形传态将编码态中的  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  按顺序传给发送方

$$|0\rangle \otimes |\psi^-\rangle = \frac{1}{2} [ |\psi^-\rangle(-|0\rangle) + |\psi^+\rangle(-|0\rangle) + |\phi^-\rangle(|1\rangle) + |\phi^+\rangle(|1\rangle) ], \quad (9b)$$

$$|1\rangle \otimes |\psi^-\rangle = \frac{1}{2} [ |\psi^-\rangle(-|1\rangle) + |\psi^+\rangle(|1\rangle) + |\phi^-\rangle(|0\rangle) + |\phi^+\rangle(-|0\rangle) ]. \quad (9c)$$

收方 Bob 测量结果决定了发送方 Alice 的测量结果,所以 Bob 知道 Alice 哪些测量结果是和实际传输的比特相同,哪些测量结果是和实际传输比特相反. 由于 Alice 可以区分自己的测量结果,但是不能确定自己测量结果是否与 Bob 发送的一致. 这种不确定性不会大于  $\frac{1}{2}$ . 因此 Bob 只需告诉 Alice 无法确定部分的测量结果以帮助 Alice 正确理解 Bob 要求重传的对象. 将测量结果告诉 Alice 需要花费一定的时间,但是以编码态作确认帧的通信协议性能还是要优于经典的选择重传 ARQ 通信协议.

### 3.4. 基于纠缠的选择重传 ARQ 量子同步通信协议

根据以上确认帧的传送和检测方法,假设重传的次数的没有限制,针对叠加态作确认帧的情况,数据链路层的选择重传 ARQ 量子同步通信协议的具体算法描述如下.

在发送节点 S: (S1) 从主机取出一个数据帧串. {每个数据帧已编序号  $M$ ,  $M$  从 0 开始,窗口尺寸应大于  $M$ }. (S2)  $V(S) \leftarrow M$ . {发送状态变量初始化}. (S3)  $M(S) \leftarrow V(S)$ . {将发送状态变量的数值写入发送序号}. 将此数据帧送交发送缓存. (S4) 将发送缓存中序号为  $M(S)$  的数据帧发送出去. (S5)  $V(S) \leftarrow [V(S) + 1]$ . {更新发送状态变量,变为下一个序号};转到(S3). (S6) 将各个数据帧分别设置相应的等待测量计时器,并计时. {选择适当的超时重传时间}. (S7) 到了测量时间  $\tau$ , 进行量子测量,判定各个数据帧对应的量子确认帧是否发回. 若已发回,则说明相应的数据帧已经被接收方接收;若未发回,则记下未发回确认帧序号  $M(S)$ . (S8) 将发送缓存中序号为  $M(S)$  的数据帧重发,转到(S6),直到发送完所有数据帧. {重传数据帧}.

在接收节点 R: (R1)  $V(R) \leftarrow M$ . {接收状态变

量初始化,  $M$  从 0 开始}. (R2) 等待. (R3) 当收到一个数据帧时,检查是否出错. 若有错,不发送否认帧,丢弃此数据帧,记录下数据帧序号  $M(S)$ , 转到 (R2); 否则,执行后续算法. (R4) 若  $M(S) = V(R)$ , 则执行后续算法;否则,丢弃此帧,记录下数据帧序号  $M(S)$ , 并转到 (R2). (R5) 将收到的正确的数据帧送交至接收缓存中. {按数据帧在本串中的位置存放,留出所缺数据帧的存储空间}. (R6)  $V(R) \leftarrow [V(R) + 1]$ , 同时执行量子测量,发送相应数据帧的量子确认帧,转到 (R2). (R7) 把记录下的未成功接收的数据帧序号  $M(S)$  赋值给  $V(R)$ , 重新接收,执行 (R2) 到 (R5). 直到收到所有重传的数据帧,再转到 (R8). (R8) 将接收缓存中完整的数据帧串送交主机.

与经典选择重传 ARQ 通信协议不同的是,量子选择重传 ARQ 通信协议只发送确认帧(量子确认帧的传送是瞬时的,传输时间忽略不计),不发送否认帧. 若在设定的时间内发送方没有收到量子确认帧,就重传那些没有被确认的数据帧或是超时的数据帧,而不必再重传那些已正确接收的数据帧;若在设定的时间内收到了全部数据帧相应的量子确认帧,则开始准备传送下一个数据帧串. 这样便极大地减轻了链路的负载,提高了链路的最大吞吐量和信道利用率.

在选择重传 ARQ 量子同步通信协议的情况下,同样假设待传送的数据帧串包含  $M$  个数据帧,数据帧出错及丢失的概率为  $p$ . 设每一个数据帧的发送时延为  $t_a$ , 数据帧沿链路从发送方 A 到接收方 B 的传播时延为  $t_p$ , 接收方 B 接收数据帧所需的处理时间和发送确认帧(或否认帧)的发送时延分别为  $t_{pr}$  和  $t_b$ , 传播时延为  $t_p$ , 而设发送方 A 处理确认帧(或否认帧)的时间也是  $t_{pr}$ . 由于数据是连续发送,同样存在数据帧之间传输时间的重叠,假设时间重叠系数为  $\beta_2$ ,  $0 \leq \beta_2 < 1$ , 重叠时间为  $\beta_2 t_f$ . 当  $\beta_2 = 0$  时,表明不存在重叠时间,也就是说只发送一个数据帧,这相当于量子停止等待协议<sup>[23]</sup>. 数据帧的发送也有先后顺序,数据帧间的发送时间不可能完全重叠,  $\beta_2 < 1$ . 若不考虑时间重叠,由于量子信息在特定情况下传输可以不需要时间,则成功发送一个数据帧所需的时间  $t_f$  为

$$t_f = t_a + t_b + t_p + 2t_{pr} = t_f - t_p. \quad (10)$$

若考虑时间重叠,则成功发送一个数据帧所需

的时间  $t'_F$  为

$$t'_F = t_f - t_p - \beta_2 t_f. \quad (11)$$

当数据帧的传送出现差错时,选择重传 ARQ 量子同步通信协议只重传那些出错的数据帧,而不必重传已正确接收的数据帧. 发送包含  $M$  个数据帧的数据帧串所需的时间为

$$T' = Mt'_F + Mt'_F \sum_{i=1}^{\infty} p^i. \quad (12)$$

在选择重传 ARQ 量子同步通信协议的情况下,正确传送一个数据帧所需的平均时间是

$$t_{AV} = \frac{T'}{M} = \frac{t_f(1 - \beta_2) - t_p}{1 - p}, \quad (13)$$

在发送方处于饱和状态下,最大吞吐量和用时间  $t_f$  进行归一化的吞吐量  $\rho_2$  分别为

$$\lambda_{\max 2} = \frac{1}{t_{AV}} = \frac{1 - p}{t_f(1 - \beta_2) - t_p}, \quad (14)$$

$$\rho_2 = \lambda t_f \leq \lambda_{\max 2} t_f = \frac{1 - p}{1 - \beta_2 - \alpha_3} \quad (\alpha_3 = t_p/t_f < 1). \quad (15)$$

比较(5)和(14)式,可得

$$\gamma = \frac{\lambda_{\max 2}}{\lambda_{\max 1}} = \frac{t_f(1 - \beta_1)}{t_f(1 - \beta_2) - t_p} > 1, (1 > \beta_2 \geq \beta_1 \geq 0). \quad (16)$$

由于采用量子确认帧,选择重传 ARQ 量子同步通信协议在单位时间内可以发送更多的数据帧,也就是说存在更大的时间重叠系数,因此有  $1 > \beta_2 \geq \beta_1 \geq 0$ . 当  $\beta_2 = 0$ , 不存在时间重叠,只发送一个数

据帧,即量子停止等待协议的情况. 由(16)式可知,  $\gamma = \frac{t_f}{t_f - t_p}$ , 该协议的最大吞吐量比经典停止等待协议有明显改善.

同样假设发送方工作在饱和状态的发送速率为每秒发送  $\lambda_{\max 2}$  帧,每个数据帧长为  $l_f$ , 每帧中数据为  $l_d$  比特,控制信息为  $l_h$  比特. 由(14)式可求出平均有效数据率  $D$  为

$$D = \lambda_{\max 2} l_d = \frac{1 - p}{t_f(1 - \beta_2) - t_p} l_d. \quad (17)$$

令  $t_f = l_f/C = (l_d + l_h)/C$ , 其中  $C$  为链路带宽,则可得选择重传 ARQ 量子同步通信协议下的信道利用率  $U_2$ , 即

$$U_2 = \frac{D}{C} = \frac{l_d}{l_d + l_h} \left( \frac{1 - p}{1 - \beta_2 - \alpha_3} \right) \quad (\alpha_3 = t_p/t_f < 1), \quad (18)$$

比较(8)和(18)式可得

$$\delta = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1 - \beta_1}{1 - \beta_2 - \alpha_3} > 1 \quad (1 > \beta_2 \geq \beta_1 \geq 0, \alpha_3 = t_p/t_f). \quad (19)$$

由(19)式可知,相对于经典的选择重传 ARQ 协议,量子选择重传 ARQ 协议的信道利用率有明显改善. 对于以纠缠态作确认帧的情况,只需将(10)式中的  $t_p$  换成  $\left(\frac{4}{5} - \frac{3}{5}p\right)t_p$ , 即  $t'_F = t_f - \left(\frac{4}{5} - \frac{3}{5}p\right)t_p - \beta_2 t_f$ . 表 1 列出了常见的数据链路层通信协议的性能. 由表 1 可以看出,利用量子力学原

表 1 常见数据链路层通信协议的性能

| 协议名称                     | 最大吞吐量                                | 归一化吞吐量                               | 信道利用率   | 备注   |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| 停止等待协议                   | $\frac{1-p}{t_f}$                    | $\frac{1-p}{\alpha_1}$               | $\frac{l_d}{l_d + l_h + l_a + 2C(t_p + t_{pr})}$                          | 用时间 $t_a$ 归一化,<br>$\alpha_1 = t_f/t_a > 1$ , |
| 量子停止等待协议 <sup>[23]</sup> | $\frac{1-p}{t_f - t_p}$              | $\frac{1-p}{\alpha_2}$               | $\frac{l_d}{l_d + l_h + Ct_p + 2Ct_{pr}}$                                 | $\alpha_2 = \alpha_1 - 1$                    |
| 连续 ARQ 协议                | $\frac{1-p}{t_f + 3(t_f + t_p)p}$    | $\frac{1-p}{1 + 3(1 + \alpha_3)p}$   | $\frac{l_d}{l_d + l_h} \left( \frac{1-p}{1 + 3(1 + \alpha_3)p} \right)$   | 用时间 $t_f$ 归一化,                               |
| 连续 ARQ 量子同步通信协议          | $\frac{1-p}{t_f - t_p + 3t_f p}$     | $\frac{1-p}{1 + 3p - \alpha_3}$      | $\frac{l_d}{l_d + l_h} \left( \frac{1-p}{1 + 3p - \alpha_3} \right)$      | $\alpha_3 = t_p/t_f < 1$                     |
| 选择重传 ARQ 协议              | $\frac{1-p}{t_f(1 - \beta_1)}$       | $\frac{1-p}{1 - \beta_1}$            | $\frac{l_d}{l_d + l_h} \left( \frac{1-p}{1 - \beta_1} \right)$            | 用时间 $t_f$ 归一化,<br>$\alpha_3 = t_p/t_f$ ,     |
| 选择重传 ARQ 量子同步通信协议        | $\frac{1-p}{t_f(1 - \beta_2) - t_p}$ | $\frac{1-p}{1 - \beta_2 - \alpha_3}$ | $\frac{l_d}{l_d + l_h} \left( \frac{1-p}{1 - \beta_2 - \alpha_3} \right)$ | $1 > \beta_2 \geq \beta_1 \geq 0$            |

其中,  $t_f$  为成功发送一个数据帧所需的时间,  $p$  为每个数据帧在传输过程中出错及丢失的概率,  $t_p$  为数据帧从发送方到接收方的传播时延,  $t_a$  为每个数据帧的发送时延,  $t_{pr}$  为接收方接收数据帧所需的处理时间,  $l_d$  和  $l_h$  分别为每个数据帧中的数据长度和控制信息长度.  $l_a$  为确认帧的长度,  $C$  为链路带宽,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为时间重叠系数.

理设计的量子同步通信协议,在最大吞吐量、归一化吞吐量和信道利用率等性能指标上都有明显的改善,在未来的军用量子通信中有着重大的应用价值.一般而言,处理时间和确认帧的发送时延都远小于传播时延,因而基于纠缠的数据链路层量子通信协议对网络性能改善及通信服务质量的提高有贡献,特别是对于远距离通信,例如卫星通信,传播时延  $t_p$  很大,效果更为明显.

## 4. 结 论

利用量子力学中纠缠态的非定域关联性,提出了一种基于纠缠的选择重传 ARQ 量子同步通信协议.在链路准备阶段建立量子信道,完成 EPR 关联

对的分发;在信息发送阶段完成量子信息和经典信息的传送,数据帧由经典链路传送,量子确认帧由量子信道发送,由于确认量子信息传输的瞬时性,缩短了传输时间,提高了链路的最大吞吐量,有效地改善了数据链路层选择重传 ARQ 通信协议的性能.对叠加态作确认帧的情况,协议性能中节省了时间  $t_p$ . 这一时间是依靠链路在空闲时间建立纠缠量子信道而换取的,相当于把时间搬移了(数据发送阶段所需花费的部分时间搬移到链路准备阶段),而且在实现量子信息的有效传输过程之前,我们还需要共享经典信息,因此我们提出的通信协议并没有违背相对论的基本原理.时间搬移处理在量子通信,尤其在军事通信领域中具有实用价值,能有效避免网络拥塞等现象.

- 
- [1] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [3] Nielsen M A, Chuang I L 2000 *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [4] Deutsch D 1989 *Proc. Roy. Soc. Lon.* A **425** 73
- [5] Poppe A, Fedrizzi A, Ursin R, Bohm H R, Lorunser T, Maurhardt O, Peev M, Suda M, Kurtsiefer C, Weinfurter H, Jennewein T, Zeilinger A 2004 *Opt. Express* **12** 3565
- [6] Deng F G, Li X H, Li C Y, Zhou P, Zhou H Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 3553  
Li C Y, Li X H, Deng F G, Zhou H Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2352
- [7] Yang Y G, Wen Q Y, Zhang X 2008 *Sci. Chin. Ser. G* **51** 321
- [8] Stix G 2005 *Sci. Am.* **292** 78
- [9] Poppe A, Peev M, Maurhart O 2008 *Int. J. Quantum Inf.* **6** 209
- [10] Wang J D, Lu W, Zhao F, Liu X B, Guo B H, Zhang J, Huang Y X, Lu Y Q, Liu S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4214 (in Chinese) [王金东、路巍、赵峰、刘小宝、郭邦红、张静、黄宇娴、路铁群、刘颂豪 2008 物理学报 **57** 4214]
- [11] Chen J, Li Y, Wu G, Zeng H P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5243 (in Chinese) [陈杰、黎遥、吴光、曾和平 2007 物理学报 **56** 5243]
- [12] Wen H, Han Z F, Zhao Y B, Guo G C, Hong P L 2009 *Sci. Chin. Ser. F* **52** 18
- [13] Wang W Y, Wang C, Zhang G Y, Long G L 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 158
- [14] Zhou N R, Zeng G H 2005 *Chin. Phys.* **14** 2164
- [15] Leung D W 2002 *Quantum Inf. Comput.* **2** 14
- [16] Zhou N R, Zeng G H, Nie Y Y, Xiong J, Zhu F C 2006 *Physica A* **362** 305  
Zhou N R, Liu Y, Zeng G H, Xiong J, Zhu F C 2007 *Physica A* **375** 693
- [17] Guo F Z, Gao F, Wen Q Y, Zhu F C 2006 *Chin. Phys.* **15** 1690
- [18] Fitz M, Gisin N, Maurer U 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 21790
- [19] Chuang I L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2006
- [20] Zhang J F, Long G L, Deng Z W, Liu W Z, Lu Z H 2004 *Phys. Rev. A* **70** 062322
- [21] Liu X S, Long G L, Tong D M 2003 *Commun. Theor. Phys.* **40** 45
- [22] Zhou N R, Zeng G H, Zhu F C, Liu S Q 2006 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **40** 1885 (in Chinese) [周南润、曾贵华、朱甫臣、刘三秋 2006 上海交通大学学报 **40** 1885]
- [23] Zhou N R, Zeng G H, Gong L H, Liu S Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5066 (in Chinese) [周南润、曾贵华、龚黎华、刘三秋 2007 物理学报 **5** 5066]
- [24] Zhang Y D 2006 *Principles of Quantum Information Physics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [张永德 2006 量子信息物理原理(北京:科学出版)]
- [25] Peres A 1988 *Phys. Lett. A* **128** 19

# Selective automatic repeat quantum synchronous communication protocol based on quantum entanglement\*

Zhou Nan-Run<sup>†</sup> Zeng Bin-Yang Wang Li-Jun Gong Li-Hua

(*Department of Electronic Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

(Received 29 April 2009; revised manuscript received 15 August 2009)

## Abstract

From the classical selective repeat ARQ (Automatic Repeat-reQuest) protocol, a selective repeat ARQ quantum synchronous communication protocol in data link layer is presented by utilizing the intrinsic characteristics of quantum mechanics. The proposed protocol divides the link into the preparation and the send stages, where the message is sent via classical channel and the preparation and distribution of EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) pairs are supposed to be accomplished at the preparation stage. The performances of several protocols in data link layer are compared and analyzed from the aspects of throughput and utilization ratio of the channel. It is shown that the proposed protocol enhances the maximum throughput and the utilization ratio of the channel effectively and improves the performance of the selective repeat ARQ protocol for data link layers. The proposed protocol is of great significance in military communications.

**Keywords:** quantum communication, quantum entanglement, selective automatic repeat protocol, synchronous communication

**PACC:** 0367, 0365, 4250

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10647133), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 2007GQS1906, 2009GQS0080), the Research Foundation of the Education Department of Jiangxi Province, China (Grant No. [2007]22), the Scientific Research Starting Foundation for the Recruit Talent of Nanchang University of China and the Innovation Project of Jiangxi Graduate Education (Grant No. YC08A026).

<sup>†</sup> E-mail: znr21@163.com