

网络编码在实时战术数据多播中的应用

张立冬^{1,2} 覃光成^{1,2} 李 臻³ 尹 浩²

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (总参第 61 研究所通信中心 北京 100141)²
(北京大学软件与微电子学院 北京 102600)³

摘 要 抽象了一种基于中心的战术应用场景与业务,并将网络编码技术应用于此类场景的实时数据多播业务中。在分析基于中心网络与 Many-to-all 业务模式特性的基础上,提出了仅在中心节点进行编码操作的传输策略以及相应的贪心算法。分析了网络编码多播策略的理论增益上界,仿真试验表明该贪心算法能够获得与理论相近的性能增益。最后的分析与仿真试验表明,在这种有中心网络的实时数据多播应用中,所提出的多播策略的实时性能要明显优于传统传输策略。

关键词 网络编码,实时,战术数据,多播,贪心算法
中图法分类号 TP915.851 **文献标识码** A

Application of Network Coding in Real-time Tactical Data Multicast

ZHANG Li-dong^{1,2} QIN Guang-cheng^{1,2} LI Zhen³ YIN Hao²

(ICE, PLAUST, Nanjing 210007, China)¹
(Communication Center, the 61st Research Institute of General Staff, Beijing 100141, China)²
(School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600, China)³

Abstract Network coding technique is used to the multicast of tactical scene, which is abstracted in this paper. And based on analyzing the characteristic of this network with central node and many-to-all traffic, a transmission policy based on coding only upon the central node and corresponding greedy algorithm were proposed. The up-bound of theoretic gain for the transmission policy based on network coding was analyzed, and simulation results show that the gain of greedy algorithm is close to the optimum. Finally, the analyzing and simulation results provide important insights that the proposed policy based on network coding has better real-time performance than the classical policy in the multicast application.

Keywords Network coding, Real-time, Tactical data, Multicast, Greedy algorithm

1 引言

通过近几年的局部战争可以发现,美军实施的每一次打击都是一个“闭环”行动,即实现情报、侦察、监视、指挥控制、精确打击、效果评估一体化。其效率在不断提高,从发现目标到实施打击的时间在大幅度缩短,而在这个“闭环”行动中,各个阶段信息的实时交互是其高效运行的核心。例如,在现代战争中经常出现的多目标空袭场景,空中作战集群对敌方地面(海面)的多个目标实施打击,敌方的空中力量、地(海)面防空火力实施拦截和还击。交战过程中参与作战的成员要在每一轮次攻击后相互报告对目标的打击效果,指挥官会据此对目标攻击的空战态势进行综合评估,以保证下一轮攻击决策部署的合理性和正确性,尽可能地做到对敌目标群的杀伤概率最大以及避免重复攻击与遗漏;参战成员还要实时交互危险目标信息,尽量使己方力量免受打击,战损降到最低。在这样的作战场景下,所有参战成员每轮次信息交互所消耗的时

间是一个极为重要的性能指标,它直接反映了作战集群应对快速变化的战场的指挥控制以及连续攻击的能力。通过压缩成员间信息交互时间,前线指挥官将有更充裕的时间来部署下一轮次的攻击行动,参与成员也将有更多的时间来理解指挥者的作战意图,以更好地执行作战命令。

从信息交互角度来看,在上述的作战场景中,无论是进攻方还是防御方,参与成员都需要交互大量的视频、语音、图像及文本信息,而这其中的绝大部分都具有较强的时间敏感性。特殊的应用需求决定了战术通信系统必须提供优越的时延保证。而从 Ahlswede 等^[1]提出网络编码概念以来的最近几年,对于一些特定类型的无线网络,学术研究已经表明网络编码是解决网络信息流问题的有效方法^[2-5],美军方也已认定网络编码未来将成为解决战术网络问题的重要手段。

本文在抽象上述作战场景网络模型的基础上,将网络编码技术应用于该场景的实时信息多播场景中,从作战应用对决策时间的要求考虑,提出了编码策略和算法,分析比较了网

到稿日期:2009-05-09 返修日期:2009-06-28 本文受国家自然科学基金(60673154,60573131)资助。

张立冬(1978—),男,博士研究生,主要研究方向为武器协同数据链相关技术,E-mail:zld_cn@163.com;覃光成(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为战术信息分发;李 臻 男,硕士生,主要研究方向为互联网软件开发;尹 浩(1959—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为通信网总体规划与设计。

络编码策略与传统存储转发技术的性能。结果表明,在这样的场景下,提出的网络编码策略及算法在保障时敏多播业务的实时交付上较传统存储转发技术具有明显的时延优势。本文第2节介绍了作战应用的网络模型;第3节描述了本文采用的网络编码策略;第4节对网络编码策略的性能进行理论分析和仿真评估;最后给出了结论。

2 网络模型

本节描述了第1节所述作战场景的网络模型,抽象出其系统模型,并依据作战的应用需求给出系统的性能评价指标,以为后续分析提供支撑。

2.1 网络场景

本文考虑如图1所示的网络场景结构图,网络中由3种类型的节点即普通节点、信息源节点及中心节点组成。信息源节点 $S_k (k=1, 2, \dots, K)$ 以一定的速率 $R=[r_1, r_2, \dots, r_k]$ 产生数据 $P_k(t_p), k=1, 2, \dots, K, t_p=1, 2, \dots, \infty$, 更新周期为 T_p 。网络中存在一个中心节点(升空平台或特定平台)与其他节点都一跳可达,并依靠其转发数据。参与节点 $V_n (n=1, 2, \dots, N)$ 接收来自信息源节点的数据以便各自构建整个战场的态势图。其信息传输时序图如图2所示,网络中的信息传输是按时隙进行的, t_p 为信息更新周期的轮数, $T_c(t_p)$ 为第 t_p 轮数据更新中完成所有信息源数据到所有参与平台的时间,而 T_D 为对应的提供作战人员的决策时间。

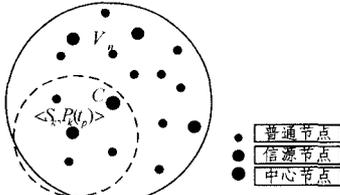


图1 网络结构抽象图

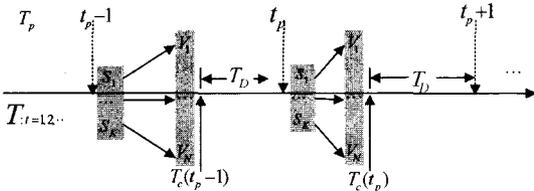


图2 信息传输时序图

由于信息源产生的信息具有较强的时间敏感特性,其实时交互对于作战人员的决策起着关键作用。而作战人员在一次数据更新中知晓所有信息源的数据以构建统一的战场态势图,是执行决策的前提条件。网络要尽快地把所有信息源的消息传输到各个平台,为作战决策提供强有力的支撑。如图2所示,网络的目标是使得完成消息传输的时间 T_c 尽量短,即使作战人员的实时决策时间 T_D 尽量长。

2.2 系统模型

由于网络应用场景以及作战的特定应用要求,网络场景的业务流模式可以抽象为信息源节点集 K 到所有参与平台节点集 N 的 Many-to-All 的多播业务流,其追求的目标是在一次数据更新中,以最少的时间完成多播业务。

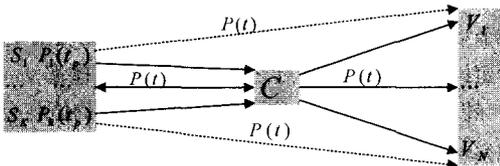


图3 系统模型图

依据上述网络场景及业务流模式,抽象出系统模型如图3所示,模型中的主要要素定义如下:

1) 信源。系统中信息源节点集 $K=\{S_k, k=1, 2, \dots, K\}$, 节点消息产生速率 $R=[r_1, r_2, \dots, r_k]$, 为简化分析,假定每个节点的速率相同,即 $r_1=r_2=\dots=r_k=r$, 产生的实时数据集 $P=\{P_k(t_p), k=1, 2, \dots, K, t_p=1, 2, \dots, \infty\}$, 其中 $P_k(t_p)$ 为有限域 F_q 的向量。

2) 信宿。系统的信宿节点集 $N=\{V_n, n=1, 2, \dots, N\}$ 。定义 $A_{n,k,t_p}(t)$ 表示信宿节点 V_n 在时隙 t 时对信源 S_k 的第 t_p 个更新分组接收情况,当 $A_{n,k,t_p}(t)=1$ (或 0) 时表示信宿节点 V_n 在时隙 t 时已经接收到(没有接收到)信源 S_k 的第 t_p 个更新分组。

3) 传输策略。定义系统在时隙 t 传输的分组表示为 $P(t)$, 对于传统路由技术,传输的分组为信息源产生的原分组 $P(t) \in P$ 。而应用网络编码技术,传输的分组 $P(t)=\sum_{k=1}^K a_k(t) P_k(t_p)$, 其中 $a_k(t) \in F_q, t_p$ 是时隙 t 所对应的周期轮数。每个节点在每次传输中选择系数 $\{a_k(t)\}$ 。网络编码传输策略的具体操作在第3节介绍。

4) 性能指标。为满足作战应用的要求,要尽力保证在数据更新周期 T_p 的时间内,将所有信息源的实时数据传输到所有参与节点。采用所有 K 个信息源节点通告一次所产生的消息传给所有参与节点的时间 T_c 为性能指标,度量系统的性能。则第 t_p 轮的 $T_c(t_p)$ 为在开始第 t_p 轮的更新时隙起到所有 $A_{n,k,t_p}(t)$ 都为 1 时的时隙之差。

3 网络编码传输策略

本文采用类似文献[6]中的网络编码传输机制,同时针对本文网络模型的两跳特性以及 Many-to-all 的业务流模式,对系统中需要进行编码的节点情况进行了分析,得出仅在中心节点进行编码就能达到编码的最优性能。编码传输策略采用监听缓存以及信息源通告邻居节点信息措施。

命题1 对于具有中心节点的网络模型,使用网络编码策略,图3的系统模型仅在中心节点编码就能达到编码的最优性能。

证明: 网络编码的性能增益是在一次传输中尽量保证其发送的编码数据对于其邻居节点都是所需要的实时数据。而信息源节点产生的数据是所有节点都需要的数据,从而在其发送数据时,仅发送源分组对于其所有邻居节点都是所需要的实时数据,所以在信息源节点无需编码,即在中心节点进行编码就能够达到编码的最优性能。

由命题1可知,在信息源节点编码对网络性能没有增益,同时在信息源节点进行编码操作将增加网络的复杂性,所以本文仅考虑在中心节点进行编码操作,这也有利于在实际中的网络实现。

此外对于编码操作,知晓越多的信息与网络拓扑信息,编码的效率越高,节点在接收到所有源节点的数据后进行编码的效率的上界要优于没有接收到完全数据源时的编码效率,而在本文的网络场景中,中心节点在接收到所有的信息源节点后再发送数据,不会影响总体的时延性能,所以本文考虑中心节点在接收到所有信息源的数据分组后,再统一进行编码发送。

3.1 监听并缓存

网络中的每一参与节点都对自己区域内的信号进行监听,并把监听的数据进行缓存。此外由于消息的实时应用,它

对前一轮的数据做删除处理,从而每个节点只保存本轮更新中的实时数据。所以对于每个节点,只需要开辟 K 个缓存空间,同时每个节点同步保存一个对应于缓存空间中分组的编码向量矩阵 A_{Rcv} ,其中 A_{Rcv} 的第 k 行向量表示缓存区中第 k 个缓存数据的编码向量。此外,每个节点保存本轮数据更新消息接收情况的映射向量 R_k , $R_k(t) = 1$ 表示节点 V_n 接收到本轮中信息源 S_k 的更新数据,在数据监听接收的过程中,同步更新 A_{Rcv} 与 R_k 对应的值。

3.2 邻居节点信息通告

参与节点在每一轮的数据更新中,通告自己所接收到的本轮更新数据接收情况,即 $A_k(t_p)$ 的值,同时信息源节点在发送数据时,也捎带自己的邻居节点列表 $N_{S_k}(t_p)$ 以及 $A_k(t_p)$ 的值。需要进行编码操作的节点依据接收到的邻居节点列表信息,按照规定的原则进行编码操作。

3.3 编码算法

对于需要进行编码操作的节点,其传输的分组为 $P(t) = \sum_{k=1}^K a_k(t) P_k(t_p)$,编码算法就是依据本地的信息确定编码向量 $a_k(t)$ 。由于本文只考虑在中心节点进行编码,中心节点保持如下数据结构,本轮接收到的数据 $P(t_p) = \{P_k(t_p), k=1, 2, \dots, K\}$,邻居节点信息列表 $N_S(t_p) = \{N_{S_k}(t_p), k=1, 2, \dots, K\}$,其中 $N_{S_k}(t_p)$ 为 N 维列向量, $N_{S_k}(t_p)(n, 1) = 1, n=1, 2, \dots, N$ 表示节点 V_n 为信源节点 S_k 的邻居节点。编码算法是依据 $P(t_p)$ 与 $N_S(t_p)$ 决定如何编码,使得每一次编码数据的传输对于接收节点总体接收的信息量最大,即编码分组对于接收节点是带有新息的,而不是冗余数据。其总目标是使参与节点集 N 能够解码出本轮数据更新的所有数据 $P(t_p)$ 所需要的时隙最小。此问题与单跳无线网络运用网络编码下最小重传次数问题等价,为 NP-hard 问题^[7]。同时许胤龙等^[8]通过图模型简化,使之成为最小团划分问题。但是最小团划分问题依然是 NP-hard 问题^[9],其图模型的转化使得即使在最优的最小团划分的基础上,依然不是最优的编码方案。本文在假定信道可靠的前提下,采用类贪心的思想,即在中心节点模拟所有参与节点的数据接收,每一个编码的分组产生都是基于参与节点中接收最少(接收向量构成的矩阵的秩最小的节点集)的节点集,每一个编码的分组尽量保证使得这些节点的秩增加。而对于信道非可靠的情况,可依据 $A_k(t_p)$ 以及接收反馈的信息进行扩展。

中心节点进行编码的基本思想是每一次获得的编码分组,必须保证对于参与节点中接收向量的秩最小的节点集来说是带有新息的,并使其接收向量矩阵的秩是增加的。具体的编码算法描述如下:

算法输入: $P(t_p), N_S(t_p)$

Step 1 依据 $N_S(t_p)$ 的列向量,对每一个接收节点,模拟构建接收向量矩阵 $A_{Rcv}(n), n=1, 2, \dots, N$,并计算每一个节点接收向量的秩 $R_{Rank}(n) = Rank(A_{Rcv}(n)), n=1, 2, \dots, N$,同时设置对应节点的接收分组映射向量 $R_k(n)$ 。

Step 2 记 $minRecvNum = \min(R_{Rank}(n))$,表示所有节点中接收的编码向量最小的秩,如果 $minRecvNum = K$,结束。

Step 3 取 $R_{Rank}(n)$ 中等于 $minRecvNum$ 的对应的节点编号集合 V_{min} ,其 $|V_{min}| = m$,去除这 m 个节点中接收编码向量矩阵 $A_{Rcv}(n)$ 相同的节点,得到接收向量矩阵互不相同其秩为 $minRecvNum$ 的节点集合 $V_{minDiff}$ 。

Step 4 依次随机选取 $V_{minDiff}$ 中接收分组映射向量 $R_k(n)$ 中为 0 元素所对应的信息源分组进行编码,得到编码向量

V_{code}, V_{code} 为输出的编码分组向量(此编码分组与这 m 个向量线性无关,从而带来新息)。

Step 5 依据得到的编码向量 V_{code} 更新每个接收节点的 $A_{Rcv}(n), R_{Rank}(n)$ 以及 $R_k(n)$ 。回到 Step 2。

算法输出:每一次循环中的 V_{code}

依据上述编码算法,一个简单的网络场景如图 4 所示,图中信息源节点数为 3,参与节点总数为 7,一种网络编码的传输策略如表 1 所列。

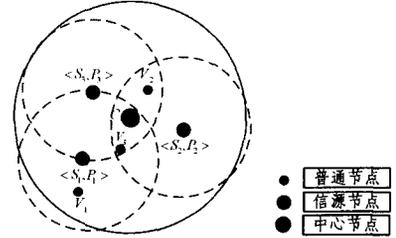


图 4 3 个信息源节点 7 个参与节点网络拓扑图

表 1 图 4 网络结构网络编码的传输策略

	t1	t2	t3	t4	t5
	S1→P1	S2→P2	S3→P3	C→P1 ⊕ P2	C→P3
S1	P1		P3	P1 ⊕ P2	P3
S2		P2		P1 ⊕ P2	P3
S3	P1		P3	P1 ⊕ P2	P3
V1	P1			P1 ⊕ P2	P3
V2		P2	P3	P1 ⊕ P2	P3
V3	P1	P2	P3	P1 ⊕ P2	P3
C	P1	P2	P3	P1 ⊕ P2	P3

从表 1 可以看出,在图 4 的场景下,使用网络编码传输策略,传输的时隙只需要 5 个,而在传统的存储转发策略下,需要 6 个时隙才能完成。

4 性能评估

本节对基于网络编码的实时数据传输进行性能评估,分析比较了信息源节点的数目以及网络拓扑对网络编码传输策略性能的影响。

假设使用网络编码完成一次传输所需要的时隙数为 T_{cod} ,传统网络传输所需要的时隙为 T_{trad} ,定义网络编码的增益 $\Gamma = \frac{T_{trad}}{T_{cod}}$ 来表征网络编码相对于传统机制的性能增益。

4.1 理论分析

命题 2 假设 m_n 表示参与节点集 N 中节点 V_n 邻居节点集中信息源节点的个数,则使参与节点集 N 中所有节点能够完全解码出 $P(t_p)$ 所需要的时隙的下界 $L = 2K - \min\{m_n; 1 \leq n \leq N\}$ 。

证明:从接收的向量对节点接收矩阵的秩的扩展来说,一个编码分组,最多只能使矩阵的秩增加 1。从而对于具有最小的 m_n 节点,最少的编码传输次数为 $K - \min\{m_n; 1 \leq n \leq N\}$,从而总的传输次数为 $2K - \min\{m_n; 1 \leq n \leq N\}$ 。

由命题 2 知,节点中对于信息源节点的邻居数是对网络编码策略网络性能的主要因素。假定网络的节点随机分布,信息源节点数越多,网络编码传输策略的性能增益会更好。即在假定网络中的任意节点之间存在链路的概率 p 一定的情况下,随着信息源节点数增大, $\min_{n=1,2,\dots,N}(m_n)$ 的值将会增大,也即网络编码传输的性能增益上界将增大。同时在信息源数目一定的情况下,网络编码的性能将随着链路存在概率 p 的

增大而增大。

4.2 仿真结果

我们通过仿真试验来比较网络编码传输与传统网络传输的性能差异。试验中假设信道传输可靠,对于不可靠的情况,由于通告机制的存在,系统可以依据通告的信息再次进行编码,编码算法一样,从而使得网络编码在信道损失情况下,同样体现其性能增益。在仿真模拟试验中,首先假定链路存在概率 $p=0.75$ 的情况下,网络节点数为 30 时信息源节点数的变化对编码性能增益的影响;而后考虑在信息源节点数 K 一定的情况下,链路存在概率的变化对编码性能增益的影响。

4.2.1 信息源节点数对编码性能的影响

在此仿真试验中,首先通过节点之间的链路存在概率 p 随机生成 50 个网络拓扑矩阵,随后依据不同的信息源节点数随机选择信息源节点构建前 K 个时隙的接收矩阵(假定中心节点在接收到所有信息源节点的消息后进行编码传输),再用贪心近似编码算法进行编码传输,并在此过程中依据命题 1 对编码最优值进行统计。依据到节点链路存在概率 $p=0.75$ 、不同的信息源节点数,得到的网络编码传输策略与传统策略的比较如图 5 所示。图 6 是对应设置下网络编码传输策略相对传统策略的增益图。

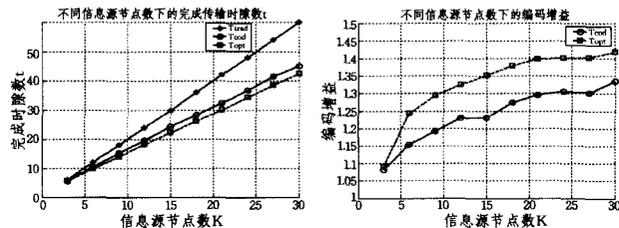


图 5 不同信息源节点下完成传输时隙对比图 图 6 不同信息源节点下网络编码传输增益

从图 5 中可以看出,随着信息源节点的增加,由于需要传输的消息的增加,两种传输策略完成所有消息的传输的时隙也相应增加,但是在网络编码传输策略下,其增长的速率较低。从图 6 中可以看出网络编码的增益区间为(1.2, 1.5),并且增益随着信息源节点的增加而增大,这是由于更多的信息源分组,可以使得编码的效率更高。

4.2.2 链路存在概率对编码性能的影响

图 7 是参与节点数为 30、信息源节点数为 18 时,不同的链路编码概率条件下,网络编码传输策略与传统策略的比较图。图 8 是对应设置下网络编码传输策略相对传统传输策略的增益图。从图中可以看出,网络编码传输的次数随着节点之间的链路存在概率增大而减小,也即网络编码的增益随着节点之间链路存在概率的增大而增大。同时在链路存在概率

大于 0.7 时,网络编码的增益可以达到 30% 之上。此外,从图 5—图 8 中可以看出,本文贪心编码算法的编码效果较为接近理论的最优编码增益。

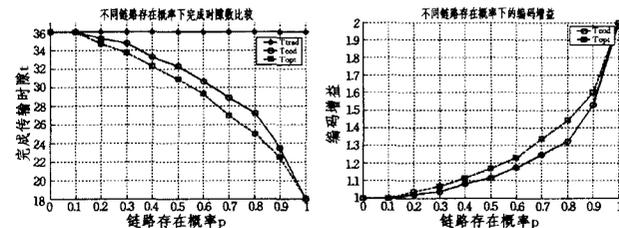


图 7 不同链路存在概率下传输完成时间图 图 8 不同链路存在概率下的编码增益

结束语 本文针对战场中基于中心的作战应用网络场景,抽象出 Many-to-all 的实时业务模型,并将网络编码应用于此模型中。基于适合作战人员决策应用的性能指标,所有节点完成接收到所有信息源信息的时间,分析得出了基于中心的网络中仅在中心节点进行编码操作能达到编码的最优性能的结论,这在很大程度上简化了在实际作战应用中的实现问题。同时针对中心节点的编码操作,提出了贪心算法,并对其性能进行了分析。最后通过仿真试验验证了贪心算法所获得的性能增益与理论增益相近,证明了网路编码传输策略能够在信息实时多播应用中取得很好的效果。

参考文献

- [1] Ahlswede R, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4)
- [2] Fragouli C, et al. Wireless Network Coding: Opportunities and Challenges [C]//MILCOM. 2007
- [3] Chachulski S, et al. MORE: Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing [C]//SIGCOMM 07. 2007
- [4] Basel K J, et al. Application of Network Coding in Tactical Data Networks [C]//MILCOM 08. 2008
- [5] Kim M, et al. Integrating Network Coding into Heterogeneous Wireless Networks [C]//MILCOM 08. 2008
- [6] Katti S, et al. XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding [C]//SIGCOMM. 2006
- [7] Rouayheb S Y E, et al. On the Minimum Number of Transmissions in Single-Hop Wireless Coding Networks [C]//Proceeding of IEEE Information Theory Workshop. 2007; 120-125
- [8] 许胤龙,等. Ad hoc 网络中基于网络编码的可靠组播 [J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(7): 860-868
- [9] J T C, et al. Automated Synthesis of Data Paths in Digital Systems [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and systems, 1986, 5(3): 379-395

(上接第 74 页)

- [5] Oliveira L B, Aranha D, Morais E, et al. TinyTate: Identity-Based Encryption for Sensor Networks [D]. University of Campinas, Brazil
- [6] Kashmir. Identity-based Cryptosystems and signatures Schemes [C]//Proceeding of Crypto'84. 1985; 47-53
- [7] Boneh D, Franklin M. Identity-Based encryption from the Weil pairing [C] // Kilian J, ed. Advances in Cryptology—Crypto

2001. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001; 213-229
- [8] Boneh D, Boyen X. Short signatures without random oracles [A]//Advances in Cryptology- EUROCRYPT 2004 [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2004; 56-73
- [9] Boneh D, Lynn B, Shacham H. Short signatures from the Weil pairing [C] // Advances in Cryptology-Asiacrypt ' 01, LNCS 2248. Springer-Verlag, 2001; 514-532