

针对IPv4协议的容错解码算法研究

陈越新^{1,2}, 郑辉², 赵艳秋², 李立忠², 曹志刚¹

(1. 清华大学电子工程系 北京 海淀区 100084; 2. 西南电子电信技术研究所 成都 610041)

【摘要】在易错网络中传输IP(因特网协议)数据包时,除了网络拥塞之外,信道误码也容易导致数据包丢失。丢包对信源恢复会造成较大影响。为了降低误码导致的丢包率,该文研究了IPv4协议解码的可靠性问题,分析了IPv4(因特网协议版本4)协议各字段之间的相关性,建立了IPv4协议容错解码的理论模型,利用最大后验概率推导出容错解码的准则。在该基础上提出一种以分段方式估计协议字段的算法,实验结果表明该算法大大增强了IPv4协议解码的纠错能力。

关键词 误码率; 纠错; 容错解码; 分组网络

中图分类号 TN915.04

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.007

Algorithmic Research on Error Resilient Decoding for IPv4 Protocol

CHEN Yue-xin^{1,2}, ZHENG Hui², ZHAO Yan-qi², LI Li-zhong², and CAO Zhi-gang¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University Haidian Beijing 100084;

2. Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute Chengdu 610041)

Abstract When transmitting Internet protocol (IP) packets over error-prone networks, bit error can cause packet loss besides network congestion. Packet loss makes a strong impact on source recovery. For the sake of decreasing packet loss ratio, we consider the problem of error resilient decoding for internet protocol version 4 (IPv4). The correlation between fields in IP packet header is analyzed, a mathematical model for error resilient IPv4 decoding, and the error resilient decoding criterion using maximum a posteriori (MAP) is deduced. Based on the decoding is constructed criterion, a novel error resilient decoding algorithm is proposed for IPv4 in segmenting form. Experimental results show that the algorithm can enhance the abilities of correcting errors significantly.

Key words bit error rate; error correction; error resilient decoding; packet networks

IPv4协议是网络通信中的重要协议^[1]。IPv4接收由低层发来的数据包,重组为IP数据包并去除报头后,将结果发送到高层协议处理;相反,IPv4接收从高层协议发送来的报文,通过分片、加入IP报头等过程后传送到低层。IPv4的主要责任是把数据包从源端传送到目的端。

IPv4协议仅对报头进行校验,在传统的IPv4协议中,如果检测到误码,IP数据包被简单地抛弃,通信可靠性由高层负责。IPv4协议的解码过程按照标准协议对报头进行解析,但是在一些场合中,有必要研究如何增强IP数据包的容错解码能力,以最大限度地恢复IP报头信息。如在利用IPv4协议传输的实时语音或视频中,这类业务对数据包延时和延时抖动要求较高^[2],利用自动重传请求(auto repeat request, ARQ)不现实。类似地,在分组交换网络上进行的电路仿真业务对实时性等QoS要求也较高,常常通过丢包隐藏(packet loss concealment, PLC)等

方法减轻数据包丢失和误码的影响^[3]。另外,在DVB单向广播等领域同样面临类似的情况,难以利用ARQ解决丢包和误码问题,少量的误码可能导致无法组报。目前关于网络协议解码可靠性的研究主要集中在网络各层协议的精心设计上^[4-7],在公开文献中较少看到关于IPv4协议解码可靠性方面的研究。本文针对这一问题进行了研究,从理论分析和实验结果都可以看出,充分利用IPv4报头的约束信息可以增强IP数据包的错误恢复能力,提高IPv4协议解码的可靠性,对提高各层协议的组报效率有十分重要的意义。

1 IPv4协议容错解码模型

1.1 IPv4容错解码模型

设信道为BSC信道,发送的IPv4报头为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$,接收报头为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, n 不能事先确定,在大多数情况下, $n=160$ 。IPv4协议

容错解码的任务是根据接收的数据包，利用报头的各种冗余信息对报头进行正确还原。显然，这个问题可视为信号的最优估计问题。根据MAP准则，对 S 的最佳估计为：

$$S^* = \arg \max_S \frac{P(X|S)P(S)}{P(X)} \quad (1)$$

IPv4报头由多个字段组成，主要包括协议版本等必选字段，特殊情况下可使用选项字段等可选字段，如图1所示。

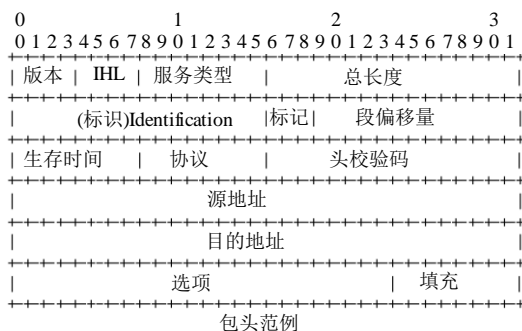


图1 IPv4报头中的字段

在报头的各字段中，大多数字段之间并没有统计相关性，可以认为先验独立。少数字段之间存在相关性，如IP分片的分片标记字段和偏移量字段之间存在相关性，此时可以将它们合并为一个字段来看待；报头长度字段和可能存在的选项字段也存在相关性，但可选字段出现概率很小，因此考虑实际情况以及为了模型的简单性，也近似认为它们先验独立。本文后面的算法中采取了相应的补偿方法，以防止这些近似可能带来的性能损失。需要注意的一点是校验码字段和所有其他字段都具有相关性，这种校验关系完全是一个确定性函数，一个合法IPv4报头在其他字段都确定的情况下，校验码字段也随之确定。总的说来，一个IPv4报头可以被切分成许多独立字段和校验字段，设发送报头中包含 L 个独立字段和一个校验字段 $S = \{s^1, s^2, \dots, s^L, s^{L+1}\}$ ，其中校验字段为第 $L+1$ 个字段，与前面先验独立的 L 个字段相关。由于其中存在着确定性的校验关系，故有：

$$P(s^{L+1} | s^1, s^2, \dots, s^L) = 1 \quad (2)$$

由于独立性，这里的字段排列顺序和IP报头可以不一致。报头的先验概率满足：

$$P(S) = P(s^1, s^2, \dots, s^L, s^{L+1}) = \prod_{k=1}^L P(s^k) \quad (3)$$

式(3)表明，发送报头的先验概率与校验字段无关。接收报头可以按照与 $S = \{s^1, s^2, \dots, s^L, s^{L+1}\}$ 的对

应关系写为 $X = \{x^1, x^2, \dots, x^L, x^{L+1}\}$ 。于是有：

$$P(X) = P(x^1, x^2, \dots, x^L, x^{L+1}) = P(x^{L+1} | x^1, x^2, \dots, x^L) P(x^1, x^2, \dots, x^L) = \prod_{k=1}^L P(x^k) \quad (4)$$

设 $f(\cdot)$ 表示度量函数，其中自变量是一个报头，或者报头的一段，则报头的MAP度量按照对数形式可以写为：

$$f(S) = \lg P(X|S) + \lg P(S) - \lg P(X) = \sum_{k=1}^{L+1} \lg P(x^k | s^k) + \sum_{k=1}^L \lg P(s^k) - \sum_{k=1}^L \lg P(x^k) - \lg P(x^{L+1} | x^1, x^2, \dots, x^L) = \sum_{k=1}^L [\lg P(x^k | s^k) + \lg P(s^k) - \lg P(x^k)] + \lg P(x^{L+1} | s^{L+1}) - \lg P(x^{L+1} | x^1, x^2, \dots, x^L) \quad (5)$$

MAP估计即为：

$$S^* = \arg \max_S f(S) = \arg \max_S \sum_{k=1}^{L+1} f(s^k) \quad (6)$$

式(6)表明，最优估计的MAP度量可以用各字段的MAP度量累积。整个IPv4报头的估计可以以 $L+1$ 次分字段估计的方式进行，大大降低了运算量。校验字段不是估计出来的，而是根据其他 L 个字段的估计值计算出来的。但是除了它的先验概率度量为0之外，校验字段的其他度量同样包含在MAP度量中。这实际上相当于在发送序列中引入了记忆性，使得分段估计的全局最优性不再成立。如果仅根据局部度量保留一条估计路径作为局部最优路径，那么最终可能导致性能损失。为了避免这一性能损失，在局部判决时，可以保留多个较优估计结果，而不是仅保留一个。最后将估计结果中具有最大MAP度量的IPv4报头作为最优估计。

1.2 模型中度的计算

对式(5)的计算，其中一个问题是计算发送字段的先验概率 $P(s^k)$ 。一般情况下，报头长度字段等于5，这种先验信息需要合理利用。选取较多实际的IPv4数据包进行统计是一个直观的方法。从网络拓扑对IPv4报头的影响来看，同一个位置的IPv4数据包报头常常具有较大相关性。选取网络同一处获取的IPv4数据包进行统计较为合理。但有两种特殊情况需要注意：一种是某些字段可以事先确定，如一些未分配的保留字段，按照协议规定固定为0即可。另外，可以统计IP数据包长度，对报头中指示数据

包长度的字段进行事先确定。这些字段不需要进行估计,也就不需要进行先验概率的计算了。另一种情况是某些字段的随机性很强,如对于数据包ID、选项等出现值无明显规律的字段,即使通过这种统计方式也很难找到规律。这时可假设字段内0、1独立等概出现,这样可以很容易地计算这些字段的先验概率。

另一个问题是计算接收字段的先验概率 $P(x^k)$ 。设接收字段长度为 $l(x^k)$, 字段的所有比特记为 $x^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_{l(x^k)}^k\}$, 对应的发送字段与接收字段等长, 设为 $s^k = \{s_1^k, s_2^k, \dots, s_{l(x^k)}^k\}$ 。采用类似于Massey的近似方法^[8], 假设对应的发送序列0、1比特独立等概出现, 根据BSC信道的无记忆特性, 可得:

$$P(x^k) = \prod_{i=1}^{l(x^k)} \sum_{s_i=0,1} P(x_i^k | s_i^k) P(s_i^k) = \prod_{i=1}^{l(x^k)} \frac{p_e + 1 - p_e}{2} = \frac{1}{2^{l(x^k)}} \quad 1 \leq k \leq L \quad (7)$$

由于接收校验字段无明显先验统计特性, 因此同样可利用上述方法近似认为:

$$P(x^{L+1} | x^1, x^2, \dots, x^L) = \frac{1}{2^{l(x^{L+1})}} \quad (8)$$

最后一个问题是接收字段与发送字段的条件转移概率的计算。对任意字段, 显然有:

$$P(x^k | s^k) = \prod_{i=1}^{l(x^k)} P(x_i^k | s_i^k) = p_e^{d(x^k, s^k)} (1 - p_e)^{l(x^k) - d(x^k, s^k)} \quad (9)$$

式中 p_e 为BSC信道的误码率; $d(x^k, s^k)$ 为发送字段与接收字段之间的汉明距离。

2 IPv4协议的容错解码算法

基于上述分析和理论模型, 本文提出了针对IPv4协议的容错解码算法。算法的基本思想类似于M算法^[9]。整个估计过程可以看成是一个最优路径搜索问题, 临时路径是一部分字段的估计结果。在旧的估计结果基础上, 对下一字段的可能值进行路径延伸的过程称为字段扩展, 扩展的字段值可称为分支。实验中可取 $1 < M < 10$, M 为防止性能损失而设置的估计结果保留数目, 算法的步骤如下:

(1) 对同一处接收的IPv4数据包进行统计, 得到各字段的先验概率;

(2) 将 M 个估计结果初始化为空比特串;

(3) 对于所有 M 个估计结果, 如果除校验字段之

外的其余字段均估计完毕, 执行步骤(7), 否则执行步骤(4);

(4) 对所有 M 个估计结果扩展下一个字段, 得到候选临时路径; 如果估计结果已不可扩展, 则候选临时路径就是它自己;

(5) 根据式(5)累积计算候选路径的MAP度量;

(6) 将具有最大局部MAP度量的 M 条路径作为这一阶段的估计结果, 并将临时度量记录下来, 返回步骤(3);

(7) 对 M 个估计结果分别进行校验计算, 之后根据式(5)更新度量, 将具有最大MAP度量的估计结果作为最优估计输出。

算法在实现时需要注意下面两点:

(1) 关于字段的先验概率问题。如果统计的IP数据包不多, 可能某些字段值没有出现在统计的IP数据包中, 导致先验概率为0, 对数度量值为负无穷大。此时需要对概率分布进行“平滑”。实验中采取的方法是: 如果出现某字段值先验概率为0的情况, 则假定该字段值在数据包统计中出现过1次, 并重新修改字段各值的概率分布。针对实时的处理情形, 先验概率的统计也可根据接收数据包实时统计更新。

(2) 关于字段扩展的问题。某些字段的可能取值非常多, 如对于IPv4地址字段, 由于字段长度为32, 因此可扩展的分支太多, 计算量较大。实验中采用汉明距离限制以减少可扩展分支的数目。具体门限值可以根据BSC信道的误码率调整, 以保证限制后对性能基本无影响。

3 实验结果及分析

实验中的7 102个IPv4数据包采集于真实网络的某个节点。实验时先根据所有数据包进行字段统计, 得到报头各字段的先验概率。之后随机挑选一些IP数据包进行蒙特卡洛实验, 最后统计恢复比例。由于数据包载荷不参与解码过程, 因此统计的误包率仅针对IP报头。IP报头出现1个以上的比特错误即表示误包。

实验所得结果如表1所示, 其中用于检验容错解码效果的数据包为1 000个。表中 I 为实验序号; P 为BSC信道误码率; D_1 为未容错的正确报头比例; D_2 为有容错的正确报头比例。

从表1可以看出, 在信道误码率小于 10^{-3} 时, 这种容错解码算法能够保证绝大部分数据包的报头正确恢复, 即误包率接近0。在误码率大于 10^{-3} 时性能

开始下降, 为了更加细致地看清楚误码率与误包率的变化关系, 实验仿真了误码率从 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 引起的误包率变化, 其中以 10^{-3} 为步长, 实验数据包个数为1 000个, 结果如图2所示。

表1 实验结果

| l | p | $D_1/(\%)$ | $D_2/(\%)$ |
|-----|--------------------|------------|------------|
| 1 | 10^{-4} | 99.0 | 99.9 |
| 2 | 10^{-3} | 90.1 | 99.6 |
| 3 | 10^{-2} | 33.5 | 92.4 |
| 4 | 5×10^{-2} | 0.2 | 57.4 |

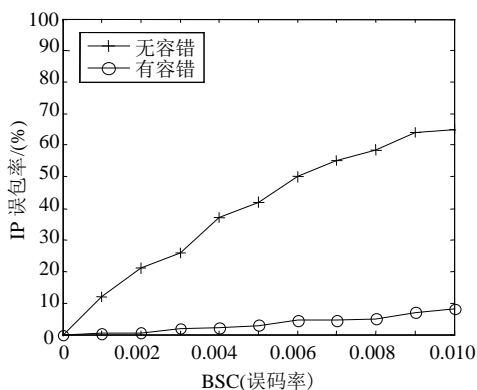


图2 误包率与误码率的关系对比图

由图2可以看出, 加入容错机制后, IP报头的恢复比例得到较大提高。当信道误码率小于 10^{-3} 时, 由于IP报头绝大多数长度为160 bit, 报头传输正确的概率为 $C_{160}^0 p_e^0 (1 - p_e)^{160} \approx 0.852$ 。如果不加入容错机制, 误包率接近15%。加入容错机制的误包率接近0。随着信道误码率逐渐增加, 未容错情况下的误包率急剧增加, 而加入容错机制以后, 增加趋势已不明显。总的来说, 由于IP报头存在各种约束, 利用这些约束进行纠错是可行的, 尤其是在误码率不算太高的场合。

4 结 论

本文建立了IPv4容错解码的数学模型, 主要针对IPv4报头内字段之间的相关性进行分析, 将独立字段和校验字段分开看待。在此基础上提出了针对IPv4协议的容错解码算法, 以分字段估计的方式取得性能和复杂度的平衡。理论分析和实验结果均表明了算法的优越性。IPv4解码可靠性的增加对提高报文重组效率有重要意义。值得一提的是, 虽然本文主要针对IPv4协议, 但其中所建立的数学模型和蕴含的算法思想很容易推广到其他类似协议的容错解码之中。

参 考 文 献

- [1] POSTEL J B. Internet Protocol, IETF RFC 791[EB/OL]. [2008-04-13]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc0791.txt>.
- [2] GOODE B. Voice over internet protocol (VoIP)[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(9): 1495-1517.
- [3] STEIN Y. In-depth comparison of TDMoIP and CESoPSN [EB/OL]. [2008-04-13]. <http://www.dspsp.com/tmoip/compare.pdf>.
- [4] PACK S, LEE H. Call setup latency analysis in SIP-based voice over WLANs[J]. IEEE Communication Letters, 2008, 12(2):103-105.
- [5] SANSO B, AWAD C, GIRARD A. Can diffserv guarantee IP QoS under failures[J]. IEEE Network, 2006, 20(4): 32-40.
- [6] CHUA T K, PHEANIS D C. QoS evaluation of sender-based loss-recovery techniques for VoIP[J]. IEEE Network, 2006, 20(6): 14-22.
- [7] ETSI TS 123 107. QoS concept and architecture, V4.3.0 [EB/OL]. [2008-04-13]. <http://www.etsi.org>.
- [8] MASSEY J. Variable-Length codes and the Fano metric[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1972, 18(1): 196-198.
- [9] POTTIE G J, TAYLOR D P. A comparison of reduced complexity decoding algorithms for trellis codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989, 7(9): 1369-1380.

编 辑 张 俊