

随机网络编码的卫星时隙 ALOHA 碰撞重传策略

朱 巍, 梁 俊, 肖 楠, 陈刘伟

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 针对卫星时隙 ALOHA 系统中,由于接入往返时延过高而导致传统物理层网络编码碰撞重传机制效率不高的问题,提出一种基于随机网络编码的卫星时隙 ALOHA 碰撞重传策略。该策略在物理层网络编码的基础上引入随机网络编码,通过对源节点数据分组随机编码,接收节点采用运算编码线性组合的方法获得原始数据分组。设计了适合该策略的数据分组格式并对该策略进行建模分析,对系统吞吐率和时延进行了理论推导。仿真结果表明,与传统的物理层网络编码碰撞重传机制相比,该策略有效地减少了 50%重传时隙数,并在用户数较小的情况下,具有较高的系统吞吐率。

关键词 卫星通信;时隙 ALOHA;物理层网络编码;随机网络编码;吞吐率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.004

中图分类号 TN927 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0017-05

A Collision Retransmission Scheme Based on Random Network Coding in Satellite Slotted-ALOHA Systems

ZHU Wei, LIANG Jun, XIAO Nan, CHEN Liuwei

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at the problem that high access round-trip delay and low throughput exist in traditional physical-layer network coding collision retransmission scheme in satellite slotted ALOHA system, an improved random network coding based collision retransmission scheme in satellite slotted-ALOHA systems is presented. This strategy brings in random network coding based on the physical layer network coding, through the source node data packet random coding, the receiving node utilizes Gaussian elimination method to obtain the original packet. A mathematical model of the proposed strategy is established, and the data packet format for the strategy is designed, and then the throughput and transmit delay are derived in theory. The results indicate that the strategy is effectual in resolving the collision, greatly reduces the transmission slots, and the strategy has a high throughput when the number of users is a few.

Key words: satellite communications; slotted ALOHA; physical layer network coding; random network coding; throughput

在传统无线通信系统中,接收端通常将各非目标信号视为干扰。常用的随机多址接入技术的目的就是为了避免或减少干扰信号的出现,即避免多路

无线通信的同时进行。文献[1]提出了物理层网络编码(Physical-layer network coding, PNC)的概念,可以从物理层解决数据包碰撞的问题。文献[2

收稿日期:2015-03-12

基金项目:航空科学基金资助项目(2013ZC15008)

作者简介:朱 巍(1990-),男,湖南长沙人,硕士生,主要从事卫星网络编码关键技术研究.E-mail:flyaway178@163.com

引用格式:朱巍,梁俊,肖楠,等.随机网络编码的卫星时隙 ALOHA 碰撞重传策略[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):17-21. ZHU Wei, LIANG Jun, XIAO Nan, et al. A Collision Retransmission Scheme Based on Random Network Coding in Satellite Slotted-ALOHA Systems[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 17-21.

~3]分析了卫星网络中应用网络编码的可行性和巨大优势,并分析了网络编码在卫星网络中应用的几种场景。文献[4]提出了一种树算法和网络编码结合的碰撞解决算法,充分利用了碰撞的数据包带来的信息,但未对系统吞吐率和时延性能进行详细分析。文献[5]提出了一种基于物理层网络编码的时隙 ALOHA 策略,该策略首次将物理层网络编码和时隙 ALOHA 结合起来,有效提高了系统吞吐量,但该策略需要实时反馈接收状态信息,这在高往返时延的卫星系统中并不适用。文献[6~7]提出一种基于分块随机物理层网络编码的随机多址接入策略,通过对用户数据进行分块随机编码,持续发送分块编码后的数据包来恢复原始信息,以达到提高吞吐率的目的,但是,该算法过于复杂,不利于在卫星上实现。

1 系统模型及可解性条件

考虑一个卫星作为接收节点以及 M 个用户作为发送群组的卫星时隙 ALOHA 系统。所有用户以时隙 ALOHA 方式发送文件,每个数据分组占用一个时隙,卫星通过反馈数据包获得数据包接收情况。系统假设包括:

- 1) 卫星和 M 个用户之间存在 M 条突发错误信道,信道状态在固定时间内保持不变。
- 2) 卫星具有碰撞检测能力和足够的缓存空间,并且卫星了解发送群组内所有用户信息。
- 3) 反馈数据包能无差错可靠传输。
- 4) 所有发送节点的消息都采用 QPSK 调制方式,并且服从严格的符号同步和载波相位同步,每个发送节点的消息相互独立。

当系统中同一时隙有多个发送节点发送消息时,那么在接收节点会发生碰撞,如果碰撞消息包括 k 个分组,那我们就称碰撞的大小为 k 。假设卫星接收端可以对接收到的和信号进行一个检测操作 f ,和信号为 x ,那么 $f(x)$ 的取值如下:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \text{ 中没有分组} \\ 1, & x \text{ 中有 1 个分组} \\ k, & x \text{ 中有 1 个以上分组} \end{cases} \quad (1)$$

同时考虑卫星在对信息检测操作过程中可以获知参与碰撞的用户信息和碰撞信息所在时隙。卫星收到碰撞信息后,对所有用户广播反馈信息,反馈信息包括:①碰撞参与用户信息;②碰撞所在时隙数。

定理 1:在 1 个目的节点和 N 个用户节点构成的卫星时隙 ALOHA 系统中应用随机网络编码的重传机制中,设某个时隙内发生碰撞的用户数为

k ,不计重传损耗的情况下,参与碰撞的用户只需在 $k-1$ 个时隙内重传随机编码后的数据包,当整个发送过程中的编码矩阵为满秩时,即可使原始在目的节点达到可解性。

证明:在上述给定的系统模型中,用户数为 N ,当在第 n 个时隙发生大小为 k 的碰撞时, k 个用户在随后的 $k-1$ 重传时隙中重传 $k-1$ 个随机编码的数据包,卫星可以在一次重传中收到 k 个碰撞组合数据包,则卫星接收到的所有数据包的编码系数构成的编码向量矩阵为 $k \times k$ 的矩阵。当该矩阵为满秩时,即通过该矩阵可以得到 k 个线性无关的方程,卫星可以通过 Gaussian 消元法求解线性方程组获得原始数据包。则在时隙 n 所有参与碰撞的数据包在卫星具有可解性。将满足定理 1 的条件称为可解性条件。

2 策略分析

2.1 数据包格式

随机网络编码重传机制通过反馈信息获得各用户碰撞的信息,并且引入随机编码来发送原始数据包和重传数据包,需对现有的反馈数据包和原始数据包的包格式重新定义。原始数据包格式:①类别域。如果值为 1 表示原始数据包,如果值为 0 表示重传数据包;②序列号域。当该数据包为重传数据包时,存放原始数据包所在时隙位置;如果数据包为普通数据包时,存放该数据包所在时隙位置;③编码系数域。存放对该数据包随机网络编码系数;④数据域。存放该数据包本身所需发送信息。

反馈数据包格式:①用户标识域:存放用户身份标识;②确认信息域:若数据包接受成功,该域值为 1;若数据包接收失败,该域值为 0;③序列号域:该数据包所在时隙位置。

2.2 基于随机编码的重传机制

当系统用户向卫星发送数据时,用户首先对数据包进行编码处理,每个数据包在有限域内随机选取一个编码系数。此时编码后的数据为:

$$M_i(n) = g_{i,n} X_{i,n}, (i \in M) \quad (2)$$

式中: $g_{i,n}$ 表示用户 i 在第 n 个时隙数据分组的随机编码系数, $X_{i,n}$ 表示在用户 i 在第 n 个时隙数据分组的有效数据。

在第 n 个时隙,系统中有 k 个用户接入,则在卫星接收端产生大小为 k 的碰撞,卫星收到的数据包可以表示为:

$$Y(n) = \sum_{i=1}^k M_i(n), (k \leq M) \quad (3)$$

当卫星检测到碰撞时,卫星广播反馈信息给所

有用户,当用户收到反馈消息之后,系统进入重传阶段。假设该时隙有 k 个用户的数据包发生碰撞,参与碰撞的用户在 $k-1$ 个时隙内持续重发数据包,重传数据包系数随机变化,则重传数据分组为:

$$M_i^r(j) = g_{i,j}^r X_{i,n}, (i \in M, j = 1, 2, \dots, k-1) \quad (4)$$

式中: $g_{i,j}^r$ 为在第 j 个重传时隙用户 i 的编码系数,则在该重传时隙卫星收到的数据为:

$$Y_n^r(j) = \sum_{i=1}^k g_{i,j}^r X_{i,n}, (k \leq M, j = 1, 2, \dots, k-1) \quad (5)$$

在经过 $k-1$ 个重传时隙后,卫星收到的所有数据为:

$$Y(n), Y_n^r(1), \dots, Y_n^{k-1} \quad (6)$$

卫星可利用 Gaussian 消元法求解线性方程组获得原始数据包。

$$\begin{pmatrix} X_{1,n} \\ X_{2,n} \\ \vdots \\ X_{k,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{1,n} & \cdots & g_{k,n} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{1,k-1}^r & \cdots & g_{k,k-1}^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y(n) \\ Y_n^r(1) \\ \vdots \\ Y_n^r(k-1) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $(X_{1,n}, X_{2,n}, \dots, X_{k,n})^T$ 为所有参与碰撞用

户有效数据; $\begin{pmatrix} g_{1,n} & \cdots & g_{k,n} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{1,k-1}^r & \cdots & g_{k,k-1}^r \end{pmatrix}$ 为卫星收到的

所有编码系数; $(Y(n), Y_n^r(1), \dots, Y_n^r(k-1))^T$ 为卫星收到的所有编码数据包。当卫星接收到的所有数据包的编码系数构成的编码向量矩阵达到满秩,根据式(7)可利用 Gaussian 消元法求解线性方程组可以无差错译出所有原始数据。

策略的具体执行流程如下:

步骤 1:在数据发送阶段,用户节点首先对数据分组进行随机编码处理,并把编码系数储存在数据包中,然后将数据分组的时隙位置写入数据分组的序列号位置,并将类别设为 1,之后发送数据包。

步骤 2:卫星收到该时隙的数据包后,若接收成功,则不发送反馈信息。若收到碰撞后的和数据包,则在反馈数据包中插入参与碰撞用户的标识和碰撞数据包所在时隙数,然后广播发送反馈数据包给所有用户。

步骤 3:当所有用户收到反馈数据包后,系统进入重传阶段,所有参与碰撞的用户重发数据包,在 n 个时隙后结束,系统恢复数据发送阶段。卫星在收到所有的重传数据后,可以通过高斯消元法恢复原始信息。

考虑一个 $M=4$ 的例子,当在时隙 n ,发送节点 1,2,4 同时接入到信道中,则会产生一个大小 $k=3$ 的碰撞。卫星收到碰撞的和信号后,检测到在时隙

n 参与碰撞的用户为 1,2,4,则在反馈数据包中插入参与碰撞用户的标识和碰撞数据包所在时隙数,然后广播反馈信息给所有用户。当所有用户收到反馈信息后,系统进入重传阶段,重传时间为 2 个时隙。假设用户 1,2,4 在时隙 n 发送的数据包为 $g_{n,1} X_1, g_{n,2} X_2, g_{n,4} X_4$ ($g_{n,1}, g_{n,2}, g_{n,4}$ 为数据包的随机编码系数, X_1, X_2, X_4 为用户 1,2,4 的有效数据),在随后的重传时隙内,用户仍然对数据进行随机编码处理。见表 1。

表 1 $k=3$ 时用户发送的数据包编码信息

Tab.1 Packet encoded information sent by user when $k=3$

| 发送端 | 1 | 2 | 4 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 时隙 n | $g_{1,n} X_{1,n}$ | $g_{2,n} X_{2,n}$ | $g_{4,n} X_{4,n}$ |
| 重传时隙 a | $g_{1,a}^r X_{1,n}$ | $g_{2,a}^r X_{2,n}$ | $g_{4,a}^r X_{4,n}$ |
| 重传时隙 b | $g_{1,b}^r X_{1,n}$ | $g_{2,b}^r X_{2,n}$ | $g_{4,b}^r X_{4,n}$ |

从表 1 中可以看到,整个过程数据发送情况可以表示为:

$$\begin{pmatrix} g_{1,n} & g_{2,n} & g_{4,n} \\ g_{1,a} & g_{2,a} & g_{4,a} \\ g_{1,b} & g_{2,b} & g_{4,b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{1,n} \\ X_{2,n} \\ X_{4,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y(n) \\ Y_n^r(a) \\ Y_n^r(b) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: $(X_{1,n}, X_{2,n}, X_{4,n})^T$ 为用户的有效数据;

$\begin{pmatrix} g_{1,n} & g_{2,n} & g_{4,n} \\ g_{1,a} & g_{2,a} & g_{4,a} \\ g_{1,b} & g_{2,b} & g_{4,b} \end{pmatrix}$ 为用户对数据包进行编码的随

机编码系数; $(Y(n), Y_n^r(a), Y_n^r(b))^T$ 为卫星在整个数据发送过程中收到的信息。当用户在数据发送阶段的随机编码系数矩阵为满秩矩阵时,根据式(8)可以得到 3 个线性无关的方程组,从而满足可解性条件。

3 性能和仿真分析

3.1 性能分析

为方便说明,将本文提出的基于随机物理层网络编码(Random physical-layer network coding, RPNC)的卫星时隙 ALOHA 策略简称为 RPNC-ALOHA,将文献[6]中提出的基于物理层网络编码(Physical-layer network coding, PNC)的卫星时隙 ALOHA 策略简称为 PNC-ALOHA。

在实际卫星系统中,由于接收节点的硬件限制以及计算复杂度的约束,可恢复碰撞的大小不能取无穷大。定义系统中最大可恢复碰撞大小为 k_{\max} 。虽然随着 k_{\max} 的增大,系统的吞吐率会持续增大,但是系统中编码和译码的复杂度会成倍增加。该策略利用高斯消元法进行解码,当碰撞大小为 k 时,其时间复杂度为 $O(k^3)$,其解码时间为:

$$T = ak^3 + O(k^3), (k \leq k_{max}) \tag{9}$$

式中： T 为随机解码时间； a 为常数； k 为碰撞参与用户数。当增大 k 时，其时间复杂度随 k 值增大而呈立方级增大，随机解码时间译码也会随之增大，而成功译码概率将会随之降低，因此我们需要找到合适的 k_{max} ，使系统的性能达到最佳。

定义系统吞吐率为很长一段时间内成功传输的数据包与传输这些数据包所花费的总时隙数的比值乘以数据包的有效载荷比。文献[6]指出，当所有发送节点的编码系数都在有限域中独立随机产生，并且无差错传输时，在接收节点成功译码概率的最小值为：

$$p = (1 - k/q)^{k^2}, (k \leq k_{max}) \tag{10}$$

式中： k 为参与碰撞的用户数； q 为随机编码有限域大小； k^2 为碰撞和重传过程中节点产生的随机编码系数总数目。文献[9]指出， $q = 2^8$ 就足够实际使用了。图 1 给出了有限域 $q = 2^8$ 情况下可解概率 p 随碰撞大小 k 变化情况。

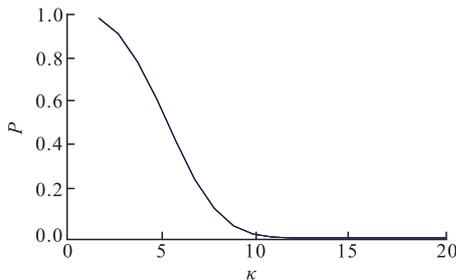


图 1 可解概率 p 变化情况

Fig.1 Solvable probability p changes

考虑系统中用户数据的到达服从参数为 λ 泊松分布，则系统中发生碰撞的概率为：

$$p_c = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, (k \leq k_{max}) \tag{11}$$

同时定义数据包有效载荷比重 η 为有效载荷的长度和数据包总长度的比值，则系统的吞吐量可以表示为：

$$\Phi = \eta \sum_{k=2}^{k_{max}} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} (1 - k/q)^{k^2} \tag{12}$$

考虑时延是在很长一段时间内所有分组时延之和与分组个数之间的比值，则该策略的时延可以反映为重传时隙的长度。考虑静止轨道卫星往返时延为 270 ms，每个时隙长度为 1 ms，则在一个往返时延内存在 270 个时隙。则在一个往返时延内系统需要重传的时隙数为：

$$T_{|RTT|} = 270 \times \sum_{k=2}^{k_{max}} (k - 1) \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \tag{13}$$

通过计算可知，在一个往返时延内，它需要的重传的时隙数与物理层网络编码时隙 ALOHA 策略

相比要小得多。

图 2 给出了在最大可恢复碰撞 $k_{max} = 10$ 时一个往返时隙内所需的重传时隙数，可以知道，与 PNCS-ALOHA 策略相比，本文提出的策略所需的重传时隙要小得多。这是由于在一次碰撞重传过程中，PNCS-ALOHA 需要重传 $k + 3$ 个时隙，而 RPNCs-ALOHA 只需重传 $k - 1$ 个时隙，所以该策略的发送等待时延要小得多。不过由于该策略利用随机编码来求解原始数据，增加了一定的计算复杂度，给接收端带来一定负担。

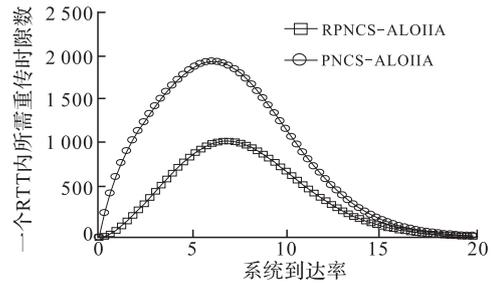


图 2 重传时隙数对比

Fig.2 Comparing the number of retransmission slots

3.2 仿真分析

为验证基于物理层网络编码的卫星时隙 ALOHA 策略的接入效率，本文分别对不同到达率和最大可恢复碰撞 k_{max} 情况下该策略的吞吐率性能进行仿真分析。仿真模型采用静止轨道卫星时隙 ALOHA 系统，包括一个静止轨道卫星和若干接入用户，系统中每个数据包长度相同，并且服从泊松到达，不考虑传输过程中发生错误。

仿真中采用的实验条件如下：考虑每个时隙长度为 1 ms，星地往返时延为 270 ms，则星地时延包括 270 个时隙。随机编码的编码域为 $GF(2^8)$ ，每个数据包的有效载荷长度为 1 200 个字节。

图 3 为 $k_{max} = 10$ 时 3 种策略吞吐率的变化。

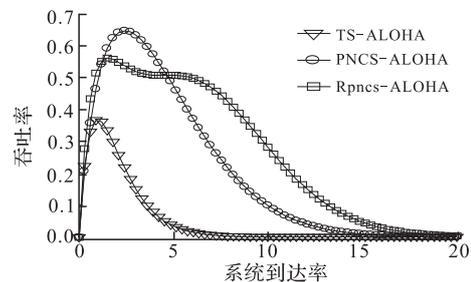


图 3 3 种策略的吞吐率变化情况

Fig.3 Three strategies changes in throughput

由图 3 可知，在较小的系统到达率下，本文提出的 RPNCs-ALOHA 策略可以达到较高的吞吐率，这是由于在碰撞较小的情况下该策略的可解性较高，并且占用的重传时隙要比 PNCS-ALOHA 策略要小得多。不过在到达率较大的情况下，由于碰撞

大小增大,导致 RPNC-S-ALOHA 策略在该有限域下的可解性降低,从而导致吞吐率下降逐渐趋向于 0。而 PNC-S-ALOHA 由于不存在可解性问题,只要碰撞大小小于 10 则可解,所以它下降的速度要比 RPNC-S-ALOHA 策略缓慢。

图 4 给出了在不同最大可解碰撞大小下 2 种策略的吞吐率变化情况。

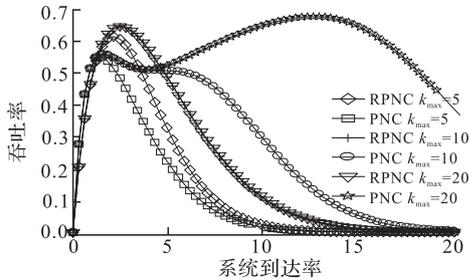


图 4 不同 k_{\max} 下 2 种策略吞吐率变化情况

Fig.4 Two strategies throughput changes under different k_{\max}

由图 4 可知,本文提出的 RPNC-S-ALOHA 策略吞吐率性能比较稳定,在最大可恢复碰撞较小的情况下也能达到较高的吞吐率。不过 $k_{\max} = 10$ 和 $k_{\max} = 20$ 的曲线几乎重合,说明在持续增大 k_{\max} 后该策略性能变化不明显,这是由于随机编码的译码存在可解概率问题,所以即使增大 k_{\max} ,也不能提高系统吞吐率。所以本文提出的 RPNC-S-ALOHA 策略只需定义较小的 k_{\max} ,能达到较高的吞吐率,并且该策略更适合用户数较小的环境。

4 结语

本文针对卫星时隙 ALOHA 系统中,由于高往返时延特性导致传统碰撞重传机制不适用的问题,提出一种基于随机网络编码的卫星时隙 ALOHA 碰撞重传策略。仿真结果表明:应用该策略能有效解决数据冲突,提升了系统吞吐率,并减少了重传时隙。该策略在引入随机编码后会增大卫星的计算开销,由摩尔定律,计算能力代价相比传输代价远远的低,这种代价是可以接受的。另外本文认为卫星可以无差错接收重传的数据分组,未考虑其他导致译码失败的因素,这些不足有待在以后的工作中改进。

参考文献(References):

- [1] ZHANG S, LIEW S C, LAM P P. Hot topic: Physical-layer Network Coding [C]//Proc of ACM Annual Int Conf Mobile Computing and Networking Los Angeles, 2006, 358-365.
- [2] 李辉,张邦宁,郭道省.网络编码技术及其在卫星通信中的应用[J].无线通信技术,2011,25(03):25-27.

- LI Hui, ZHANG Bangning, GUO Daoxing. The Technique of Network Coding and Its Application in Satellite Communications [J].Wireless Communication Technology, 2011, 25(3),25-27.(in Chinese)
- [3] VIEIRA F, SHINTRE S, BARROS J. How Feasible is Network Coding in Current Satellite Systems? [C]//Proc of Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (asma) and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2010:31-37.
- [4] 陈琛.一种新的基于网络编码的碰撞解决算法[J].信息技术,2013,11(3):106-113.
CHEN Chen. A Newly Proposed Collision Resolution Algorithm Based on Network Coding [J].Information Technology, 2013, 11(3):106-113.(in Chinese)
- [5] COCCO G, IBARS C, GUNDUZ Herrero D, et al. Collision Resolution in Slotted ALOHA with Multi-user Physical-Layer Network Coding [C]// Proc of IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), Budapest, Hungary, 2011:1-4.
- [6] JSAPER GOSELING, MICHAEL GASTPAR, JOS H WEBER. Random Access with Physical-layer Network Coding [J].Information Theory IEEE Transactions on, 2015,61(1):3670-3681.
- [7] JSAPER GOSELING, MICHAEL GASTPAR, JOS H WEBER. Physical-layer Network Coding on the Random-access Channel [C] // Proc of IEEE International Symposium on Information Theory, 2013:2339-2343.
- [8] COCCO G, IBARS C, GUNDUZ D, et al. Practical Issues in Multi-user Physical Layer Network Coding [C]//Proc of Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2012:205-211.
- [9] ROSSETTO F. A Comparison of Different Physical Layer Network Coding Techniques for the Satellite Environment [C]//Proc of Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS), Cagliari, Italy, Sep. 2010:25-30.

(编辑:姚树峰)