

## 直升机起降中无线紫外光喷泉码引导方法研究

赵太飞\* 刘雪 娄俊鹏

(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

(光纤传感与通信教育部重点实验室(电子科技大学) 成都 610054)

**摘要:** 为了提高直升机在应急无线紫外光通信辅助起降中信标搜寻、定位降落的效率和可靠性, 该文提出一种基于喷泉(LT)码的分等级编码通信方案, 采用不同等级编码的分级方法设计了不同场景、不同引导阶段的通信策略, 分析了高丢包率信道环境中变化删除概率下的误比特率, 并与其他传统信道编码进行了比较。实验仿真结果表明, 在二进制删除信道下, 该分等级编码方法可显著降低 LT 码的误比特率, 提高了编译码性能; 该通信策略适用于高丢包率信道环境, 能获得更好的通信效果, 提高了直升机应急辅助起降的安全性。

**关键词:** 紫外光通信; 喷泉码; 直升机助降; 引导方法

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)10-2452-08

DOI: 10.11999/JEIT150004

## Research on Wireless Ultraviolet Guiding Fountain Code Technology of Helicopter Emergency Landing

Zhao Tai-fei Liu Xue Lou Jun-peng

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Key Lab of Optical Fiber Sensing & Communications (UESTC), Ministry of Education, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and the reliability of the helicopter guiding in the beacon researching and locate landing, an encoding communication scheme based on unequal level coding Luby Transform (LT) code is proposed. Different communication strategies are proposed for different scenarios. The different guiding strategies considering the unequal level coding scheme are designed. The bit error rate of the unequal level coding LT code with different communication strategies is analyzed. The coding scheme and communication strategy are simulated by computer. The simulation results show that the bit error rate of the unequal level protection encoding scheme is significantly reduced and the coding performance is improved over binary erasure channel. The strategies can adapt to different channel environments, and the reliability of communication is improved. Thus, helicopter emergency landing safety is improved.

**Key words:** Ultraviolet communication; Fountain code; Helicopter landing guiding; Guiding method

### 1 引言

直升机应急救援在处理突发事件过程中, 具有快速、高效、受地理空间限制少的优势<sup>[1]</sup>。同时, 随着我国低空空域的开放<sup>[2-4]</sup>, 中国民用直升机将会大规模应用。随着直升机应用越来越广泛, 其使用中的安全问题也越发突出。据统计, 直升机在下降

至着陆阶段发生事故的概率占总事故概率的 67%<sup>[5]</sup>。例如在野外救援行动或城市突发事件中, 没有正规的起降场地时, 仅靠飞行员经验判断降落条件, 极易造成误撞等飞行事故<sup>[6]</sup>; 舰载直升机中, 由于驱逐舰和护卫舰的起降甲板狭小, 横摇与纵摇角度大, 舰上大气湍流异常复杂以及机库空间有限, 舰载直升机使用和保障难度大<sup>[7,8]</sup>; 无人机降落中对于地面特征信息的获取、位置位姿的自主调整更为重要<sup>[9]</sup>。

现有的直升机助降系统一般采用可见光标、图像分析或旗语以及地面引导人员通过无线电与飞行员的沟通等<sup>[10-12]</sup>。这些方式大都无法满足全天候、非视距的助降通信, 此外这些方式对天气、能见度、电磁环境等要求较高, 且操作复杂。无线紫外光辅助起降技术是利用紫外光散射特性进行复杂环境下全天候通信的一种直升机应急安全保障手段, 满足野外行动、城市突发事件、地震灾害等场合。无线紫外光通信由于其抗干扰能力强、全天候非视距、便携、宽视场、保密性能力强等特点, 在直升机辅助起降通信中能够充分发挥其优势<sup>[13]</sup>。

收稿日期: 2015-01-05; 改回日期: 2015-03-31; 网络出版: 2015-06-18

\*通信作者: 赵太飞 year623@163.com

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金(U1433110), 陕西省科技计划工业公关项目(2014K05-18), 陕西省教育厅产业化培育项目(2013JC09), 西安市科学计划项目(CXY1435(4))和西安市碑林区科技计划项目(GX1302)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China-Civil Aviation Administration of China Joint Research Fund (U1433110); The Industrial Public Relation Project of Shaanxi Technology Committee (2014K05-18); The Research Project of Shaanxi's Ministry of Education (2013JC09); The Science Program of Xi'an (CXY1435(4)); The Science Program Project of Beilin District in Xi'an (GX1302)

应用无线紫外光辅助起降技术过程中，直升机在搜寻信标、定位、降落过程时，由于直升机携带接收端高速移动，地震灾后不稳定的受灾现场，树木、建筑物等阻挡造成不稳定的信道环境，使得通信过程中数据接收延时较大，丢包严重，甚至通信中断。此时，如果使用传统的前向纠错码(FEC)，较大的通信延时、巨大的丢包率使得反馈重传方式效率极低<sup>[14]</sup>。喷泉(LT)码是一类无固定码率码，发送端可以产生任意多个编码包，接收端只要获得足够多的编码符号就能够成功恢复出信息符号，无需反馈，通信中断时可通过后续接收编码包恢复出完整文件<sup>[15]</sup>。在直升机辅助起降紫外光通信高丢包率的信道环境中，应用喷泉码能够提高直升机搜寻信标、定位降落的效率，增强通信可靠性，提高直升机降落的安全性。

数字喷泉(Digital Fountain)概念是由 Byers 等人于 1998 年首次提出<sup>[16]</sup>，主要针对大规模数据分发以及可靠数据广播而提出的有效解决方案。2002 年，Luby<sup>[17]</sup>提出了第 1 种可实现的喷泉码-LT(Luby Transform)码。2006 年，Shokrollahi<sup>[18]</sup>在 LT 码的基础上提出了另一种实用喷泉码-Raptor 码，从此喷泉码受到了广泛的研究和应用。对于 LT 码的非均等数据保护也是研究热点，但是非均等保护的 LT 码大都针对同一数据帧中不同重要等级数据提供不同等级保护<sup>[19,20]</sup>，而对于不同数据帧之间的分等级保护讨论较少。此外，文献[21]中将 LT 码应用于室内可见光通信，分析了发射端高移动性、对准偏差以及高中断概率时 LT 码的性能，但是该文献系统模型中没有分析接收端的移动性对通信性能的影响，直升机助降中主要为接收端的高速移动；文献[22]定义了 4 种译码重启策略，每种重启策略中加入不同的修复符号，4 种译码方案主要分析了译码成功率与消耗时间之间的关系，但是，该文没有考虑信源与目的节点之间多变的信道环境以及不同信道丢包率的影响；文献[23]通过增加 LT 码中编码包的多样性，提高了信息传输的可靠性，但是增加多样性使得 LT 编码的复杂度增加，效率降低；文献[24]针对时变的噪声信道，设计了一种低复杂度的自适应 LT 码，根据预先设计好的一系列度分布来调整码率，但是针对不同的信道噪声采取不同的度分布进行自动调整匹配实现难度较大。

本文针对直升机辅助起降搜寻信标及定位降落过程中时变的信道特征，提出了一种分等级编码(Unequal Level Coding, ULC)的 LT 码，以时变的丢包率为参量分析了 ULC-LT 码的译码误比特率，并与传统 LT 码进行了比较；结合 ULC-LT 码方案提出了不同搜寻阶段的传输策略，该策略能够提高辅助起降通信中的译码成功率，降低误比特率，保

证了高信道丢包率时的可靠通信，提高了直升机搜寻、定位、降落的效率和安全性。

## 2 直升机辅助起降中无线紫外光通信策略

### 2.1 辅助引导不同阶段

无线紫外光辅助直升机降落可分为 3 个阶段：

(1)信标搜寻阶段：该阶段直升机高速移动并盘旋下降，不断搜寻信标所发送的广播信息。如图 1 所示，此时直升机处于信号搜寻阶段，信标发送的广播信息可能遇到山坡、建筑、树木等障碍物遮挡，通信效果最差，甚至通信中断。该阶段目的是快速高效确定信标位置。

(2)对准阶段：该阶段直升机飞行范围基本确定在无线紫外光散射通信覆盖范围内。如图 2 所示，信标(发送端)与接收端基本在垂直接收范围内，对准偏差会造成少量丢包，相对移动变小，通信过程没有障碍物阻挡，信道条件变好。该阶段目的是调整直升机姿态，为降落阶段做准备。

(3)降落阶段：直升机垂直下降的过程中，通过姿态微调，保持接收端与信标的对准。此时高对准、低移动性基本消除了信标搜寻和对准阶段通信丢包和通信中断的缺点。

### 2.2 不同降落阶段通信策略划分依据

由于降落场景的复杂多变，植被、河流覆盖，山体遮挡等都会影响无线通信的性能<sup>[25]</sup>。例如，楼宇间震后建筑物的摇摆、伸缩会影响无线光通信的链路性能<sup>[26]</sup>；在森林火灾等救灾现场，森林火场变化无常，树木、山体的遮挡会造成通信中断<sup>[27]</sup>；海上救援中海面波动也会影响通信效果；为了保证不同搜寻阶段、不同场景下直升机辅助起降紫外光通信的高效可靠进行，不同搜寻阶段需要采用不同的通信策略，例如，通过不同码长、不同的编码等级以及不同的数据量控制，来保证不同信道环境的可靠通信。

为了明确不同码长对 LT 码译码性能的影响，在二进制删除信道模型下，对不同码长以及不同译码开销下，LT 码的性能进行了仿真分析。图 3(a)为当接收到相同数量的编码包时，不同码长 LT 码的译码误比特率 BER(Bit Error Rate)对比；图 3(b)为不同译码开销下 LT 码译码成功率的比较结果。

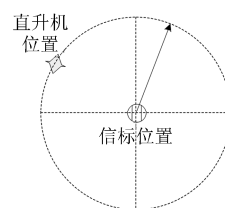


图 1 信标搜寻阶段示意图

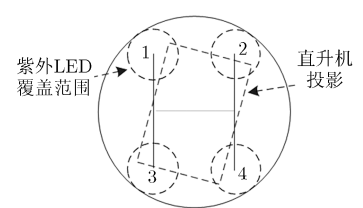
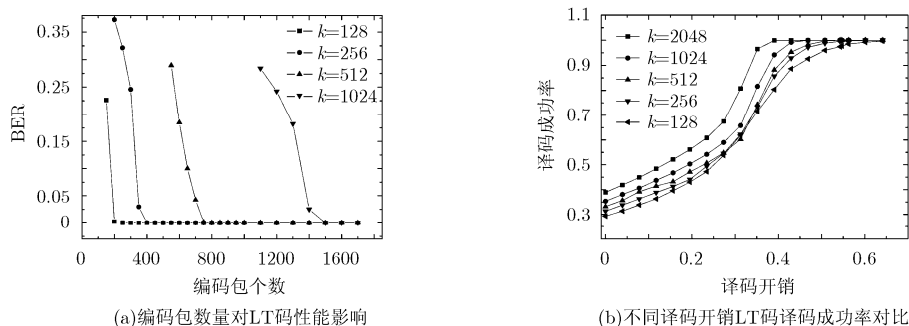


图 2 对准阶段示意图<sup>[14]</sup>



(a) 编码包数量对LT码性能影响

(b) 不同译码开销LT码译码成功率对比

图 3 LT 码性能仿真

从图 3(a)可以看出,对于不同数据帧长度的 LT 码,当接收到相同个数编码包时,数据帧长度越短,单帧译码误比特率越低;从图 3(b)可以看出,随着译码开销的增加,译码成功率不断提高;在相同译码开销下,长码长的 LT 码译码成功率相对较高,短码长 LT 码完成译码需要更大的译码开销,冗余度较大。总体看来,码长较短时,其译码所需的编码包数量不再趋于原始数据包的长度,长码长 LT 码单帧数据译码所需数据包个数大于短码长 LT 码;但是从整个数据长度来看,长码长 LT 码译码所需的数据包更加趋近原始数据包长度。因此,在信标搜寻阶段,信道环境相对较差,采用短码长 LT 码,能够以相对较少的编码包数量恢复出单帧原始数据;对准和降落阶段,采用长码长 LT 码,能够缩短全部原始数据包的译码时间,提高编译码效率。

### 2.3 不同降落阶段通信策略

由于紫外光的大气传输特性,大气环境中紫外光水平方向与垂直方向的透过率不同<sup>[26]</sup>,不同波长的紫外光衰减程度也不相同,因此,通过信标同时发送 240 nm, 250 nm, 270 nm 波长的日盲段紫外光广播信息。240 nm 波段紫外光采用短码长 ULC-LT 码,发送降落环境二值图像数据以及降落场位置坐标等数据信息;250 nm 波段紫外光采用长码长 ULC-LT 码,发送降落环境灰度图像数据以及风速、地貌种类等数据信息;270 nm 波段紫外光采用长码长 LT 码,发送降落环境全彩图像数据以及地表坡度、舰面横摇纵摇角度等数据信息。具体通信策略如下:

信标搜寻阶段通信策略。由于不同场景下,山体、树木、层叠楼宇建筑的影响,信标覆盖范围可能达不到预期。该过程信道丢失率大,该阶段目的是快速高效确定信标位置,对环境细节要求相对较低。此时接收 240 nm 波长紫外光信号,该波段发送的二值图像数据量是全彩图像的 1/24,接收端能够快速恢复降落场大致场景,解析出的信标位置信

息能够确保直升机快速定位信标位置。

对准阶段通信策略。接收端基本在紫外光散射通信覆盖范围内,信道丢失率变小,该阶段对净空条件、悬停条件要求较高。此时接收 250 nm 波长紫外光信号,该波段发送的灰度图像数据量是全彩图像的 1/3,接收端接收到的灰度图像数据能够快速恢复出净空环境的纹理信息。同时风速等数据能够辅助飞行员判断悬停条件。

降落阶段通信策略。该阶段接收端与信标(发射端)对准偏差很小,信道丢失率较低,对环境细节要求最高。此阶段接收 270 nm 波长紫外光信号,该波段实时传输降落场环境图像数据以及地面坡度信息,辅助飞行员实时调整直升机位姿,保证直升机安全可靠降落。

## 3 ULC-LT 码

由于直升机搜寻信标、定位降落的过程中,信道环境实时多变,ULC-LT 编码等级的设计是为了保证不同信道环境下信息传输的可靠性。尤其在信道丢失率较大时,ULC-LT 码能够提高译码成功率,确保信标数据的可靠传输。例如在信标搜寻阶段,信道环境最差、丢包严重,采用最高编码等级能够保证信标位置信息的可靠传输和高效快速解析,辅助直升机迅速搜寻信标位置。因此,ULC-LT 码的设计是为了保证信道条件差时信息的可靠传输,提高译码成功率。

### 3.1 ULC-LT 码等级划分

度分布是保证 LT 码编译码效率的关键<sup>[29]</sup>。文献详细叙述了 LT 码的编译码算法并设计一种性能较好的度分布函数-鲁棒孤波分布函数(Robust Soliton Distribution, RSD)。其编译码算法简单,复杂度也相对较低。对于原始  $k$  个源数据包,接收端只需要接收到  $N = k(1 + \epsilon)$  个编码分组后,就能以较大的概率恢复原始数据包,其中,  $\epsilon$  为译码开销,  $N$  略大于  $k$ 。RSD 分布函数  $\mu(i)$  表达式为

$$\mu(i) = (\rho(i) + \tau(i)) / \beta, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

其中  $\beta = \sum_{i=1}^k \rho(i) + \tau(i)$ ;  $\rho(i)$  为理想孤波分布函数(ideal soliton distribution)。

$$\rho(i) = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 1/i(i-1), & i = 2, 3, \dots, k \end{cases} \quad (2)$$

令:  $R = c \cdot \ln(k/\delta) \sqrt{k}$ , 其中常数  $c > 0$ ,  $\delta$  为接收到  $N$  个数据包后允许译码失败的最大概率。 $\tau(i)$  定义为

$$\tau(i) = \begin{cases} R/ik, & i = 1, 2, \dots, k/R - 1 \\ R \ln(R/\delta)/k, & i = k/R \\ 0, & i = k/R + 1, k/R + 2, \dots, k \end{cases} \quad (3)$$

对于一个好的度分布, 大部分节点的度值应该较小, 减少编译码的异或计算次数; 度为 1 的编码包要有一定比例, 才能启动译码; 少量度值较大的编码包, 以保证覆盖所有的源数据包<sup>[30]</sup>。ULC-LT 码是一种基于 RSD 的 LT 码, 其产生编码包时, 在保证覆盖所有源数据包的基础上, 调整度为 1 的编码包所占的比例来提高译码成功率。本文选取  $k=256$ , 译码开销  $\varepsilon = 0.2$ , 鲁棒孤波分布的 LT 码, 应用 BP(Belief Propagation)译码算法<sup>[31]</sup>, 来确定度为 1 的编码包的不同比例对译码误比特率以及编译码时间的影响。仿真结果如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出, 随着度为 1 的编码包在所有编码包中所占的比例不断增大, 译码 BER 不断减小, 其中度为 1 的编码包所占比例在 0.20~0.24 和 0.24~0.27 区间范围时, 译码 BER 下降最快。由图 4(b)可以看出, 当度为 1 的编码包所占编码包的比例超过 0.28 时, 完成编译码消耗的时间急剧上升, 极大降低了编译码的效率。结合译码成功率和编译码效率的折中考虑, 1 级、2 级编码保护中, 度为 1 的编码包在所有编码包中所占的比例区间分别为: 0.20~0.24, 0.24~0.27。

### 3.2 ULC-LT 码实施步骤

本文将 ULC-LT 码分为两级, 分别为 ULC-LT-1, ULC-LT-2, 保护强度依次增强。根据划分的编码包所占比例区间, 进行 ULC-LT 码编码。编码等级算

法实施步骤如下:

步骤 1 划分数据帧。将原始数据分为  $s$  帧数据,  $s$  为总码长,  $k$  为每帧数据的长度。

步骤 2 判断数据帧编码等级。判断该数据帧的编码等级, 通过编码等级确定度为 1 的编码包所占的比例范围, 同时确定该数据帧产生的编码包数量  $N$ 。

步骤 3 产生度值。在  $(0, 1)$  范围内产生随机数  $a$ , 根据度分布函数  $\mu(i)$  和产生的随机数  $a$  确定一个编码包的度值  $d$ ; 进行  $N$  次该操作, 产生  $N$  个编码包的度值为  $d(1), \dots, d(j), \dots, d(N)$ 。

步骤 4 选取数据包。根据步骤 3 中产生的  $N$  个度值  $d(1), d(2), \dots, d(j), \dots, d(N)$ , 每个编码包每次在该帧数据中随机选取  $d(j)$  个数据包, 总共进行  $N$  次, 完成数据包的选取。

步骤 5 判断数据包是否完全被覆盖。根据步骤 4 中每个编码包随机选取的数据包, 判断该帧数据产生的所有编码包是否覆盖该帧数据中所有的数据包, 如果是则进行步骤 6, 否则返回步骤 4。

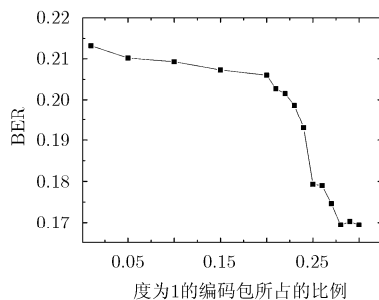
步骤 6 判断是否满足编码等级要求。根据步骤 2 中确定的该数据帧的编码等级, 判断产生的数据包中, 度为 1 的编码包所占编码包的比例是否在该等级的划分范围内, 如果是则进行步骤 7, 否则返回步骤 4。

步骤 7 产生编码包。根据步骤 4 中每个编码包选取的数据包, 每次对随机选出的  $d(j)$  个数据包进行异或, 产生一个编码包, 总共进行  $N$  次, 得到该帧数据的  $N$  个编码包。

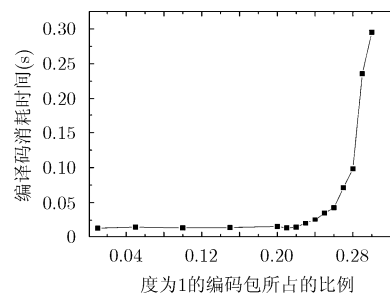
## 4 仿真结果

### 4.1 不同错误概率和变化删除概率下传输性能分析

在考虑外界干扰、背景噪声的情况下, 传输过程会造成误码。在不同错误概率和不同删除概率时, 对  $k=1024$  的 RS(15,9)码、ULC-LT 码和 LT 码进行仿真分析, 译码开销为 0.4 时, 译码 BER 的对比如图 5 所示。



(a) 度为 1 的编码包对 BER 的影响



(b) 度为 1 的编码包对编译码时间的影响

图 4 度为 1 的编码包的不同比例对 BER 和编译码时间的影响

从图 5(a)可以看出,相同的错误概率下,RS 码的纠错性能优于 LT 码。从图 5(b)可以看出信道删除概率对于 RS 码译码性能影响较大。在直升机辅助起降紫外光通信中,由于采用日盲紫外 LED 作为信源发送信息,近地日盲紫外 LED 散射通信信道是一种较为理想的信道<sup>[32-34]</sup>,直升机辅助起降紫外光通信中主要考虑丢包对通信的影响。因此,LT 码更适合应用于直升机应急辅助起降通信中高丢失率的通信信道。

#### 4.2 ULC-LT 码性能分析

直升机搜寻信标过程中,根据其所处的位置不同,其丢包率是不断变化的,针对这一问题,在不同译码开销下,对固定删除概率 ULC-LT 码与随机删除概率的 ULC-LT 码(Random Erasure Probability ULC-LT code, REP-ULC-LT)进行了仿真,随机删除概率是在以某一删除概率为上限的随机丢包,例如当丢包率设置为 1 时,每个编码包传输的丢包率都为随机概率  $P$ ,且  $P \in [0,1]$ ;同时,应用本文所提出的 ULC-LT 码分级标准,选取码长  $k=256$ ,在不同编码等级不同译码开销时,与未采用分等级编码的 LT 码进行仿真对比;仿真结果如图 6 所示。其中随机删除概率是以最大丢包率为 1 的时变丢包率,当丢包率为 1 时,即直升机不在紫外光散射通信覆盖范围内或者由于阻挡,接收端无法接收到信标所发出的紫外光信号。

图 6(a)可以看出在相同的译码开销下,随机删除概率的译码成功率在固定删除概率为 0.4 上下浮动。即当直升机搜寻信标阶段,删除概率在 0.4 左右。由图 6(b)可以看出,译码开销小于 0.55 时,在相同的译码开销下,随着保护等级的增高,误比特率逐渐降低。ULC-LT-2 等级编码误比特率最低,ULC-LT-1 等级编码误比特率次之,ULC-LT 码的误比特率小于传统的 LT 码。保护等级最高的编码方式,最先完成完全译码。当译码开销大于 0.55 时,已经接收到足够多的编码包,足以恢复出源码符号,此时编码等级对 BER 的影响较小。因此,该分等级编码保护方案在信道情况较差或者丢包率较大时,能显著降低译码 BER,提高译码成功率。

#### 4.3 不同通信策略 ULC-LT 码性能分析

本文提出了不同编码等级的 LT 码编码方案,分析了不同码长以及信道丢失率对直升机辅助起降紫外光通信性能的影响;针对不同搜寻阶段、不同场景,提出了不同的通信策略。在不同通信策略性能仿真中,选取不同码长 LT 码,采用不同编码保护等级,产生相同数量编码包,在不同类型删除概率下,进行译码 BER 对比。主要考虑丢包对通信性能的影响,随机丢包率分别设置为最大丢包率为 0.1~0.6 的随机丢包,仿真结果如图 7(a)所示,其中变化的删除概率是以对应的删除概率为上限的变

化删除概率,其 ULC-LT 码选取第 2 级编码。同时结合直升机在峡谷中降落过程时的复杂的通信条件进行了仿真对比分析,由于该场景下直升机搜寻信标过程是信道环境最差的阶段,由于岩石、土丘等障碍物的阻挡使得通信丢包极其严重,甚至通信中断,并且由于太阳光中紫外线的影响,会产生少量误码。针对该实际场景,设置最大丢包率为 1 的随机删除概率,加入噪声概率为 0.01,采用码长  $k=512$ ,在不同译码开销情况下,ULC-LT 码译码 BER 与传统 LT 码译码 BER 仿真结果如图 7(b)所示。

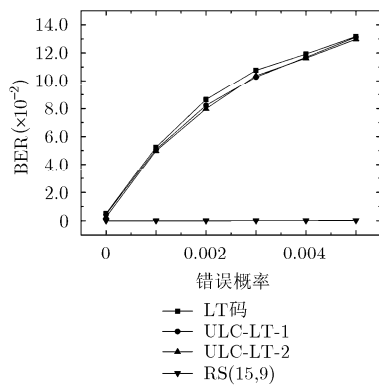
由图 7(a)可以看出, $k=256$ ,相同删除概率时,ULC-LT 码误比特率低于传统 LT 码的误比特率。 $K=128$  删除概率小于 0.4 时,ULC-LT 码与传统 LT 码都基本完成译码,译码 BER 差距较小;删除概率大于 0.4 时,ULC-LT 码的译码 BER 小于传统 LT 码,分等级编码的优势得到体现。以某删除概率为上限的变化丢包率总体误比特率低,因为其平均丢包率小于丢包率的上限。由于编码包的数量一定,短码长 LT 码的冗余度高,其误比特率也是最低的。

从图 7(b)可以看出,在复杂恶劣的通信环境中,需要更大的译码开销来保证成功译码;在该实际场景模拟仿真中,当译码开销高于 0.7 时,ULC-LT 码的优势开始体现,相同译码开销下,ULC-LT 码译码成功率更高,更加适合于恶劣环境下。

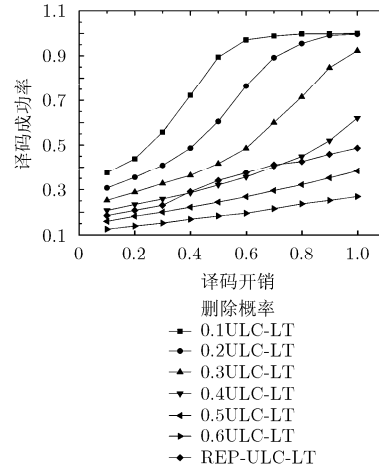
相同译码开销情况下,传输不同波长发送的图片数据,其图像恢复效果如图 8 所示。图 8(a)为 3 幅图像数据均采用短码长,传统 LT 码;图 8(b)3 幅图像数据采用本文提出的不同码长传输策略以及 ULC-LT-2 码。由图像恢复效果可以看出,采用本文提出的编码保护等级以及传输策略,直升机降落不同阶段传输的图像数据恢复效果优于未采用分等级编码时的恢复效果。应用最高等级编码方式以及本文的通信策略图像恢复噪点低,画质更加清晰,能够达到更好的传输效果。

## 5 结束语

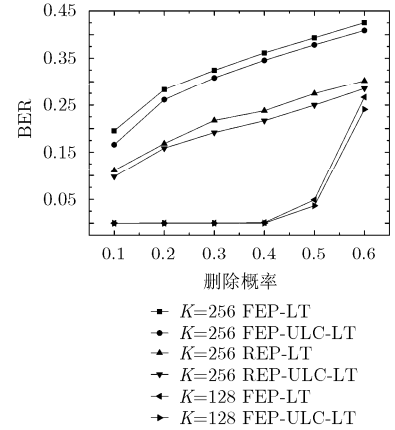
在直升机应急辅助起降紫外光通信中,信道环境实时多变,丢包是影响其通信性能的主要因素。采用喷泉码能够实现直升机的快速可靠定位与安全降落。喷泉码无固定码率和无需反馈的优势使得它适合应用于直升机辅助起降紫外光散射通信中。为了适应不同场景以及复杂信道环境下的通信,在保证信息传输效率的同时,提出了不同级别的编码保护和不同的通信策略,并进行了仿真分析。仿真结果表明,与其它通信方案相比,本文所提出的通信策略能够提高喷泉码编译效率,降低译码误比特率,更好地适应不同的信道环境,保证了在各种信道环境下信息的高效可靠传输,提高了应急直升机起降的安全性。



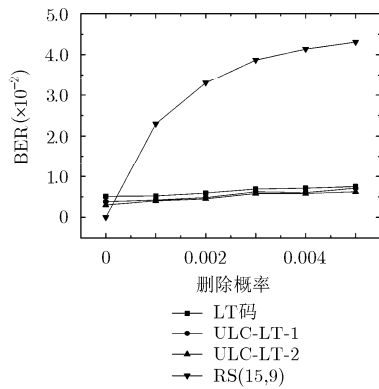
(a)不同错误概率下BER对比



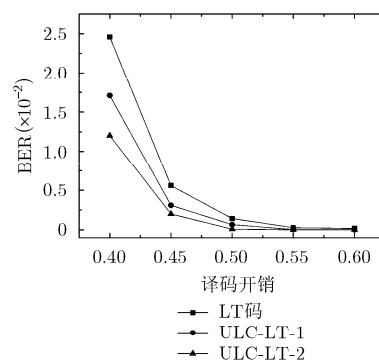
(a)不同删除概率译码成功率比较



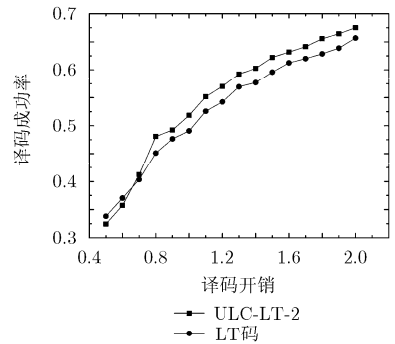
(a)不同传输策略译码BER对比



(b)不同删除概率下BER对比



(b)不同编码等级译码BER对比



(b)实际场景仿真译码成功率对比

图 5 不同错误概率和不同删除概率下 LT 码和 RS 码 BER 的对比

图 6 ULC-LT 码性能仿真

图 7 不同等级以及实际场景中 ULC-LT 码性能仿真



(a) LT码不同阶段图像恢复效果



(b) ULC-LT码不同阶段图像恢复效果

图 8 不同传输方式的图像恢复比较

### 参 考 文 献

[1] 陶白江, 孙可, 曾丁. 建立我国的直升机空中“120”救援系统势在必行[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2014, 9(3): 247-249.  
Tao Bai-jiang, Sun Ke, and Zeng Ding. Establishment of a helicopter air “120” rescue system is imperative[J]. *Chinese Journal of Injury Repair and Wound Healing*, 2014, 9(3): 247-249.

[2] 张璐晶, 孟祥凯: 加快低空空域管理改革[J]. 中国经济周刊, 2014, 14(10): 48-49.  
Zhang Lu-jing and Meng Xiang-kai. Speed up low-altitude

airspace management reform[J]. *China Economic Weekly*, 2014, 14(10): 48-49.

[3] 宗合. 真高 1000 米以下空域实行分类管理有序放开[N]. 中国航空报, 2014-11-25001.  
Zong He. 1000 meters below the airspace of category management and orderly release[N]. *China Aviation News*, 2014-11-25001.

[4] 于祥明. 低空空域改革倒计时 系列政策或年底前揭盅[N]. 上海证券报, 2014-11-22003.  
Yu Xiang-ming. Low-altitude airspace reform countdown[N]. *Shanghai Securities News*, 2014-11-22003.

[5] 曾天翔. 飞机事故及其原因统计分析[J]. 航空标准化与质量,

- 1998, 26(6): 37-43.
- Zeng Tian-xiang. Statistical analysis of aircraft accidents and their causes[J]. *Aeronautic Standardization & Quality*, 1998, 26(6): 37-43.
- [6] 邹元振, 孙文胜. 民用直升机飞行事故分析及对策[J]. 直升机技术, 2007, 6(4): 58-64.
- Zou Yuan-zhen and Sun Wen-sheng. Civil helicopter accident analysis and countermeasures[J]. *Helicopter Technique*, 2007, 6(4): 58-64.
- [7] 刘孙波, 施平安, 陈聚和. 舰载直升机起降安全性分析及其评估[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(2): 106-109.
- Liu Sun-bo, Shi Ping-an, and Chen Ju-he. Analysis and evaluation of ship-based helicopter take-off and landing safety[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(2): 106-109.
- [8] 唐大全, 毕波, 王旭尚, 等. 自主着陆/着舰技术综述[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(5): 550-555.
- Tang Da-quan, Bi Bo, Wang Xu-shang, *et al.* Summary on technology of automatic landing/carrier landing[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(5): 550-555.
- [9] Yang Song-pu and Wang Yang-zhu. Research on visual navigation technology of unmanned aerial vehicle landing[C]. 2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Yinchuan, August, 2013: 463-467.
- [10] Saripalli S, Montgomery J F, and Sukhatme G. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(3): 371-380.
- [11] Scherer S, Chamberlain L, and Singh S. Autonomous landing at unprepared sites by a full-scale helicopter[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(12): 1545-1562.
- [12] Kaloshin G A. Scientific fundamentals of laser aids for low visibility approach landing of aircraft[C]. The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Chiba Japan, 2001: 15-19.
- [13] 赵太飞, 吴鹏飞, 宋鹏. 无线紫外光直升机辅助起降通信技术研究[J]. 激光杂志, 2014, 35(10): 9-13.
- Zhao Tai-fei, Wu Peng-fei, and Song Peng. Research on the wireless ultraviolet communication technology in helicopter launching and landing guidance[J]. *Laser Journal*, 2014, 35(10): 9-13.
- [14] Gou Liang, Zhang Geng-xin, Bian Dong-ming, *et al.* Relay scheme based on distributed Luby transform codes for InterPlaNetary internet[J]. *China Communications*, 2013, 10(10): 1-11.
- [15] 慕建君, 焦晓鹏, 曹训志. 数字喷泉码及其应用的研究进展与展望[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1571-1577.
- Mu Jian-jun, Jiao Xiao-peng, and Cao Xun-zhi. A survey of digital fountain code and its application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(7): 1571-1577.
- [16] Byers J W, Luby M, and itzenmacher M. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data[C]. Proceedings of SIGCOMM 98 Conference on Applications, Columbia Canada, 1998: 56-67.
- [17] Luby M. LT codes[C]. 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science in Proc (FOCS), Vancouver Canada, 2002: 271-282.
- [18] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information*, 2006, 52(6): 2551-2567.
- [19] Zhang Wu-ping, Jing Xiao-rong, Zhang Zu-fan, *et al.* Image transmission with UEP-LT over MIMO channels[C]. Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), Chongqing, 2013: 105-108.
- [20] Rajkumarsingh B and Basant S. LT codes with block duplication and ring type constellation for unequal error protection[C]. 2014 IEEE Region 10 Symposium, Kuala Lumpur Malaysia, 2014: 336-341.
- [21] Barbot N, Torkestani S S, Sahuguede S, *et al.* LT codes performance over indoor mobile wireless optical channel[C]. IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Poznan Poland, 2012: 18-20.
- [22] Mladenov T, Nooshabadi S, and Kiseon Kim. Strategies for the design of raptor decoding in broadcast/multicast delivery systems[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 423-428.
- [23] Apavatjrut A, Goursaud C, Jaffrès-Runser, *et al.* Toward increasing packet diversity for relaying LT fountain codes in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(1): 52-54.
- [24] Hussain I, Land I, Chan T H, *et al.* A new design framework for LT codes over noisy channels[C]. 2014 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Honolulu USA, 2014: 2162-2166.
- [25] 范喜全, 匡镜明. 一种复杂环境下的战术通信信道仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2502-2504.
- Fan Xi-quan and Kuang Jing-ming. Simulation method of tactical communication channel under complex environment[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(9): 2502-2504.
- [26] 梁大为, 鲍振武. 无线光通信性能影响因素分析[J]. 电子测量技术, 2006, 29(2): 21-22.
- Liang Da-wei and Bao Zhen-wu. Analyses of influential

- factors of wireless optical communication performance[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2006, 29(2): 21-22.
- [27] 李华, 宋光辉, 吴鹏超. 国外森林防火通信技术现状与展望[J]. 中国林业, 2008, 10(19): 50-51.
- Li Hua, Song Gang-hui, and Wu Peng-chao. Forest fire situation and prospects of foreign communications technology[J]. *Forest Research*, 2008, 10(19): 50-51.
- [28] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3-43.
- Ke Xi-zheng. UV Adhoc Communication Network Theory[M]. Beijing: Science Press, 2011: 3-43.
- [29] Jing Yue, Lin Zi-huai, Vucetic B, *et al.*. The design of degree distribution for distributed fountain codes in wireless sensor networks[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney NSW, 2014: 5796-5801.
- [30] Zhu Hong-peng, Zhang Geng-xin, and Li Guang-xia. A novel degree distribution algorithm of LT codes[C]. IEEE International Conference on Communication Technology, Hangzhou, 2008: 221-224.
- [31] Li Lu-ying, Li Zong-yan, and Wang Wen-bo. Adaptive iteration for fountain decoding[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2010, 17(2): 22-25.
- [32] Chen Gang, Feras Abou-Galala, and Xu Zheng-yuan. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links[J]. *Optical Society of America*, 2008, 16(19): 59-68.
- [33] Zuo Yong, Xiao Hou-fei, Wu Jian, *et al.*. Closed-form path loss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2116-2118.
- [34] El-Shimy M A and Hranilovic S. Spatial-diversity imaging receivers for non-line-of-sight solar-blind UV communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(11): 2246-2255.
- 赵太飞: 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 研究方向为紫外光通信网络、无线光通信等.
- 刘 雪: 男, 1989 年生, 硕士, 研究方向为喷泉码编译码.
- 娄俊鹏: 男, 1991 年生, 研究方向为 ARM 应用开发.