

无人机对地光通信临界调制速率锁定

刁红翔¹, 常丽敏¹, 唐雁峰²

- (1. 空军航空大学 飞行器控制器系, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了在现有条件下对无人机遂行对地光通信任务的调制传输速率有一个准确的衡量, 需要建立合适的机载光通信大气信道模型。首先划分空域范围, 将影响要素限定在对流层内; 之后基于对流层典型大气效应建立了综合影响模型, 又进一步建立了无人机对地光通信的信道传输模型。在现有条件下进行无人机参数设置, 并对不同高度条件下无人机对地光通信的有效信息总量进行仿真, 得到了遂行光通信任务的最佳通信高度为 2 660 m; 在此高度条件下, 通过选取合适调制速率点对信道传输模型进行仿真。结合临界有效信息总量的设置及仿真结果, 在满足光通信系统反馈检验需求的基础上, 将无人机光通信临界调制速率需求锁定在 1.12 Gbps。为现有条件下光通信调制系统的设计提供了评估标准, 具有较强的指导意义。

关键词: 光通信临界调制速率; 飞行层次; 典型大气效应; 信道模型; 反馈检验

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1022004

Critical modulation rate locking under UAV's optical communication to ground

Diao Hongxiang¹, Chang Limin¹, Tang Yanfeng²

- (1. Department of Aircraft Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to have an accurate measure about modulation transmission rate of UAV's optical communication tasks to ground in the current conditions, a channel model which is suitable for airborne atmospheric optical communication needs to be established. Firstly, the airspace range was divided, the influencing factors was limited in the troposphere. Then the comprehensive influence model was established based on tropospheric typical atmospheric effect, and further the channel transmission model was established under UAV's optical communication to ground. Parameters setting about UAV was made under the existing conditions, and total amount of effective information was simulated under UAV's

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-04-22

基金项目: 武器装备军内科研项目(KJ2015023300B41068)

作者简介: 刁红翔(1993-), 男, 硕士生, 主要从事空间激光通信方面的研究。Email: 1064619821@qq.com

导师简介: 常丽敏(1975-), 女, 教授, 博士, 主要从事惯性导航与制导方面的研究。Email: 1309084957@qq.com

optical communication to ground on different heights, the best height for carrying out optical communication tasks was obtained which was about 2 600 m. At this altitude, the channel transmission model was simulated by selecting appropriate modulation rate points. Combined with the critical effective total information's setting and the simulation results of channel model, on the basis that the needs for feedback test about optical communication system was met, the critical modulation rate needs of UAV's optical communication was locked in 1.12 Gbps. The result provides the evaluation standard for the design of the optical modulation system under existing conditions and it has a strong guiding significance.

Key words: critical modulation rate of optical communication; flight level; typical atmospheric effect; channel model; feedback test

0 引言

随着激光通信技术的日趋成熟,利用无人机搭载激光通信单元将获得比无线电通信更加明显的优势。但是无人机在遂行对地光通信任务时主要飞行在大气层内,且激光信号在大气中传输时容易受到大气信道的影响导致通信质量变差。

因此在现有技术条件下,建立合适的大气信道对光通信的影响模型很有必要,通过分析该模型可以得到无人机光通信过程中激光信号在大气中传输时的衰落特性随相关参数的变化规律,从而准确把握机载光通信的动态通信过程。

对于大气信道的建模和分析,前人也做过相关的研究。针对大气衰落效应进行建模和分析时,确定性模型起步较早且发展迅速,Parsons等在参考文献[1]中对衰落信道描述时,引入了抽头延时线模型,但是该模型适用对象更加接近于微波波段,在描述光通信时效果并不理想,需要进一步改进才能应用;Schulze建立的基于蒙特卡罗近似的高斯分布广义平稳非相关散射信道模型,便于计算机仿真,是一种常用的描述大气信道散射效应的方法;其他学者的研究也集中在对特定大气效应的模型建立上;在对无人机飞行状态重点考虑的情况下,金石等人在参考文献[2]中分别利用不同模型对不同状态下的无人机数据链信道进行建模仿真;并对各数据链信道模型的基本特征和turbo均衡技术做了研究;徐仪华等人在参考文献[3]中基于飞行轨迹对无人机信道进行了建模;范昭波等人在参考文献[4]中分析了

不同状态无人机通信系统的平坦衰落信道。他们的研究重点在无人机飞行状态的划分上,对大气本身的影响机制考虑欠缺,不能很好地满足实际情况。

综上所述,前人的工作往往偏重于对信道影响因子的特定方面进行研究,针对性较强但综合因素考虑不够,并且在对相关指标进行分析时大多停留在定性的层次,缺少进一步的量化,对实际指导意义不大。

文中在分析大气信道自身性质对光通信影响的基础上,建立了无人机对地光通信时的综合信道模型,仿真分析得到了满足现阶段大容量通信的高速率调制临界速率量化指标。旨在为无人机遂行高速光通信任务及机载光通信调制系统的设计提供相关评测标准,更好的指导实践。

1 光通信无人机飞行层次界定

结合大气在铅直方向上的层次划分及常用飞行器的通用升限,可以做出如图1所示的空域分布图。

无人机的飞行高度范围较广,可以覆盖从几十米到几万米的高空,具备全空域飞行的能力。对于遂行光通信任务的军用无人机来说,其飞行层次大多集中在对流层顶部以及平流层底部。无人机在进行通信时,以无人机与地面站的双向通信模式为主,而对流层中气象复杂多变,温度和气压不均,含有大量的气溶胶颗粒以及各种大气分子。相对于单一均匀稳定的透明传输介质而言,这些因素的存在会对通过其中的光信号产生一定的不利影响,因此在分析大气信道对光通信及光调制的影响情况的时候,对流层中的各种物理变化及影响因子是首要关注的对象。

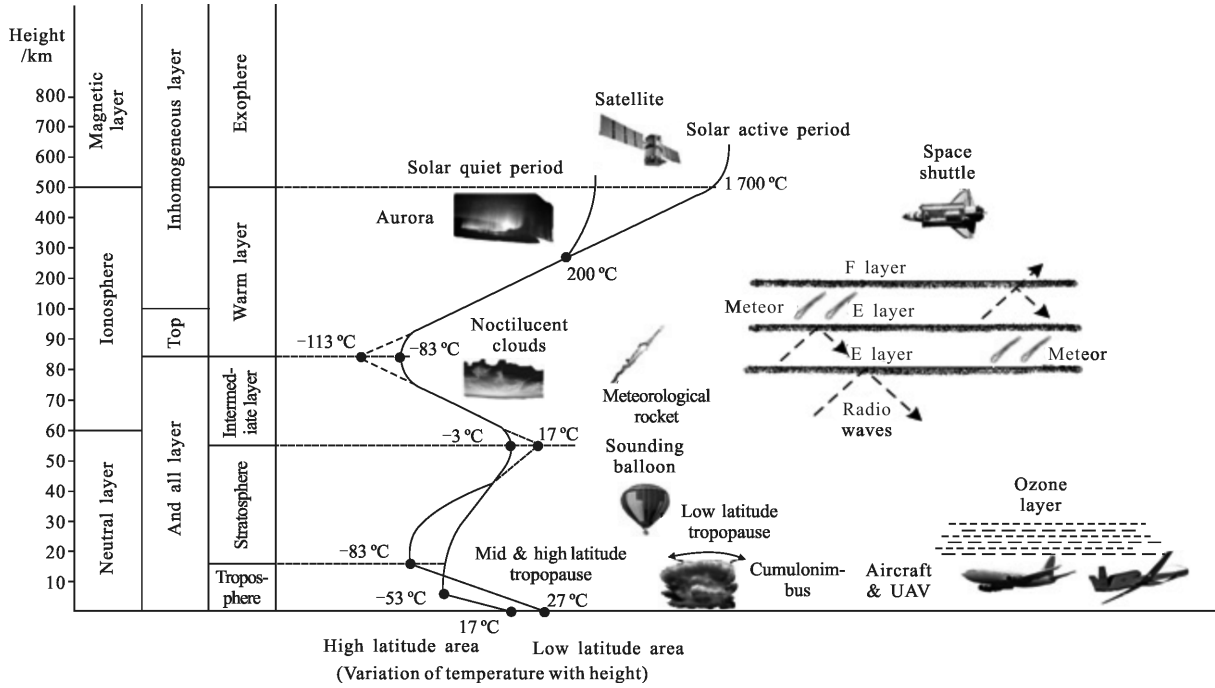


图 1 空域分布

Fig.1 Spatial distribution

2 对流层大气典型效应

激光信号在对流层大气中传播时，主要会受到大气衰减和大气湍流两种因素的影响，这两种典型效应根据影响效果的不同又可以进行细分，其具体分类情况和作用机理如图 2 所示^[5]。

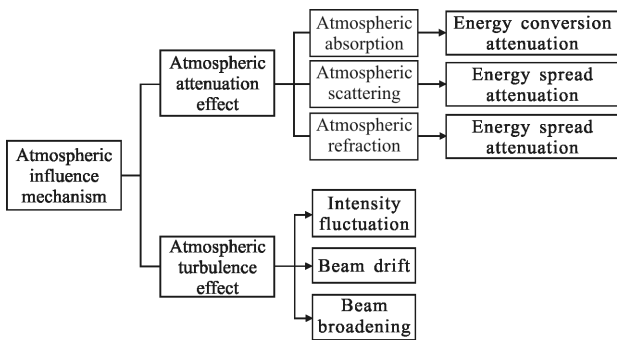


图 2 大气影响分类机制

Fig.2 Classification of atmospheric effects

3 大气效应综合影响分析

通常，在机载光通信的过程中，大气对光信号的影响往往是复合型的，即上述各种因素并存，这种影响可以用大气透过率来定量地进行描述。大气透过

率定义为接收光强和发射光强的比值，并遵从比尔-郎伯特定律：

$$T(\lambda) = \frac{I}{I_0} = \exp\left[-\int_0^d u(\lambda) dl\right] \quad (1)$$

式中： $T(\lambda)$ 为透过率； I 为接收端光强； I_0 为发射端光强； d 为传输距离； $u(\lambda)$ 为大气衰减系数，它可以用影响因子加权的形式表示：

$$u(\lambda) = k_1\alpha(\lambda) + k_2\beta(\lambda) + k_3\gamma(\lambda) + k_4\delta(\lambda) \quad (2)$$

式中： $\alpha(\lambda)$ 、 $\beta(\lambda)$ 、 $\gamma(\lambda)$ 、 $\delta(\lambda)$ 分别为大气吸收、散射、折射和大气湍流引发的衰减系数； k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别为它们的影响权重。在 $k_1=k_2=k_3=k_4=\frac{1}{4}$ 的情况下(各种影响要素权重相同)，衰减因子表达式可以转化为：

$$u(\lambda) = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q} \quad (3)$$

式中： q 为影响因子，与大气能见度有关，其一般关系为^[6]：

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.585V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

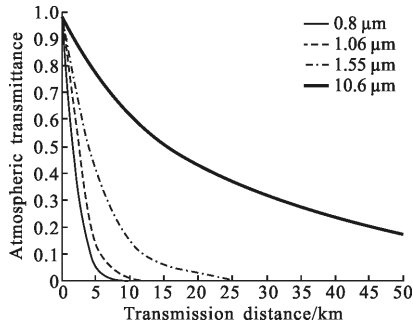
这也反映了大气能见度和大气透过率的关系，在此基础上得到：

$$T(\lambda) = \exp\left[-\int_0^d \left[\frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q}\right] dl\right] \quad (5)$$

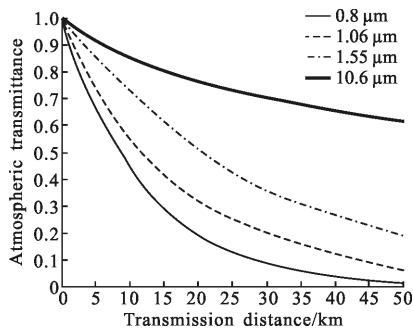
$$T(\lambda) \propto \frac{1}{C_n^2 \cdot d} \quad (6)$$

式中: V 为大气能见度; C_n^2 为大气折射率结构常数。

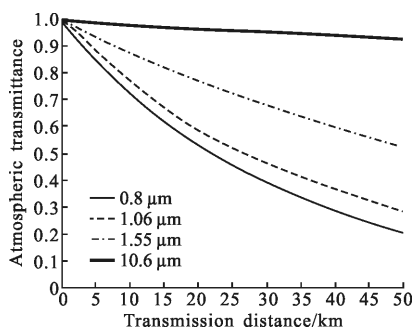
选取常用的四种激光波段 (0.8、1.06、1.55、10.6 μm) 进行大气透过率与通信距离的数值模拟仿真^[7], 并分别在三种不同的能见度等级条件下进行, 结果如图 3 所示。



(a) 能见度 5 km
(a) Visibility 5 km



(b) 能见度 40 km
(b) Visibility 40 km



(c) 能见度 70 km
(c) Visibility 70 km

图 3 常用激光波段大气透过率与通信距离关系仿真图

Fig.3 Simulation of the relationship between the atmospheric transmittance and the communication distance in common laser waveband

由仿真结果可以看出: 在大气能见度一定的条件下, 随着激光波长的增加, 相同传输距离下大气透过率逐步增加; 对于同一波长的激光, 随着大气能见度的增加, 相同传输距离下大气透过率逐渐增加; 当能见度较低时 ($V=5 \text{ km}$), 随着传输距离的增加, 大气透过率呈指数衰减的趋势, 而且对于波长较短的激光信号, 在传输距离接近能见度时, 衰减量已经超过 90%, 信号强度和准确性受到严重影响。综上可知, 激光通信质量的好坏在很大程度上受到传输距离和天气条件的影响, 这也是开展光通信应该重点考虑的因素。

对于实际的光通信系统, 为了得到发散角较小, 能量更加集中的初始光束以便获得更远的传输距离, 通常在发射端对光束进行准直处理, 这时的光束可以作为平面波进行处理, 对应的误码率的计算公式为^[8]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta}{\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

式中: η 为光强比例因子, 其数值大小只与激光载波的特征光强有关, 用公式表示为:

$$\eta = \frac{I_1 - I_0}{I_1 + I_0} = \frac{1}{\langle \varepsilon^2 \rangle} = \frac{1}{\langle \chi^2 \rangle} \quad (8)$$

式中: I_1 、 I_0 分别对应于加载信号的光波中强相关性信息和弱相关性信息对应的平均光强; ε 为信噪比; χ 为对数振幅; $\langle \varepsilon^2 \rangle$ 、 $\langle \chi^2 \rangle$ 分别为信噪比对数振幅方差和平面波对数振幅方差。在湍流起伏情况下, 平面波光强服从对数正态分布, 其对数振幅和对数方差为:

$$\begin{cases} \chi = \frac{1}{2} \ln(I/A^2) \\ \sigma_{\ln I}^2 = 4\sigma_\chi^2 \end{cases} \quad (9)$$

同时满足:

$$\begin{cases} \langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \\ \sigma_{\ln I}^2 = 1.24 C_n^2 k^{7/6} d^{11/6} \end{cases} \quad (10)$$

式中: I 为光强; A 为原始光信号幅值; $\sigma_{\ln I}^2$ 为对数光强方差; σ_χ^2 也表示对数振幅方差。

结合公式(6)~(10)可进一步推导出特定位置误码率与大气透过率的一般关系为:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{4}{\sqrt{2} \sigma_{\ln I}^2} \right] = \operatorname{erfc} \left[\frac{4T(\lambda)}{\sqrt{2} \times 1.24 k^{7/6} d^{5/6}} \right] \quad (11)$$

式中: k 为与大气状态无关的常量; $\operatorname{erfc}(x)$ 为高斯误

差函数且：
$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt。$$

4 无人机载光通信信道建模与仿真

4.1 信息量传输方程的建立

无人机主要遂行与地面目标之间的双向通信,在这一过程中,不仅需要考虑大气信道本身对通信的影响,还要考虑到飞机的相关运动参数等因素。其中,相关运动参数主要包括飞行速度、飞行高度、光学通信器件的极限摆角范围。在这三个参数中,飞行高度和光学通信器件的极限摆角决定了光通信有效信息传输段的长度;而光通信有效信息传输段的长度和飞行速度共同决定了有效信息传输时间长度。示意图如图 4 所示。

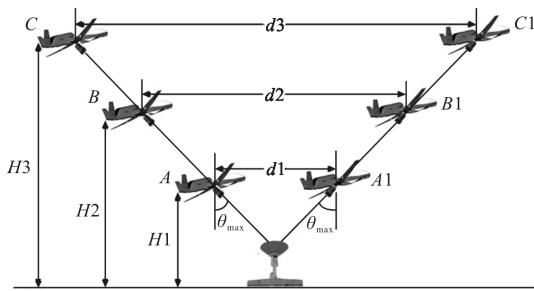


图 4 无人机对地通信示意图

Fig.4 Schematic diagram of UAV's communication to ground

对应飞行高度分别为 H_1 、 H_2 、 H_3 的无人机,其通信可通距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ,通信可通时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 ,且满足:

$$\begin{cases} t_1 = d_1/v = \frac{2H_1 \tan \theta_{\max}}{v} \\ t_2 = d_2/v = \frac{2H_2 \tan \theta_{\max}}{v} \\ t_3 = d_3/v = \frac{2H_3 \tan \theta_{\max}}{v} \end{cases} \quad (12)$$

在无人机实施光通信的过程中,若无人机飞行高度过低(对应于 t_1 的通信时段):此时通信可通时间较短,且当无人机与地面目标的倾斜角度较大时,容易受到具有一定高度的地物目标的阻断遮挡,使得通信传输效果变差;若无人机飞行高度较高时(对应于 t_3 的通信时段),此时通信时段长,信息具有足够的传输时间,但此时在光通信过程中,大气信道的衰减影响变得不可忽略,较高的误码率需要更高的传

输调制速率进行弥补,因此在特定的飞行参数条件下,寻求合适的通信高度对于光通信的顺利开展具有至关重要的意义。

在现有条件下,光通信用无人机在通信时的飞行速度 v 一般为 240 m/s,光学通信器件的摆动角度 θ 在 $-82^\circ \sim 82^\circ$ 之间^[9],飞机光通信的调制传输速率为 u Gbps(在具体的计算仿真中令 $u=1$),由此可知在整个的通信可通时间内无人机所能传输的信息总量为:

$$W = ut = \frac{2H \tan \theta}{v} u \quad (13)$$

为方便,式中取 $\theta = \theta_{\max} = 82^\circ$ 。

在总的有效通信时间内,还需要考虑平均误码率的大小,以便得出有效通信量的大小。根据特定位置误码率的表达式(11),可以求得在一段通信距离均匀变化的范围内平均误码率(平均衰减率)的大小为:

$$\overline{BER} = \frac{\int_{ds}^{de} BER dl}{de - ds} = \int_H^{H/\cos \theta} \operatorname{erfc} \left[\frac{4 \exp \left[- \int_0^d \left[\frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \right] dl \right]}{\sqrt{2} \times 1.24 k \frac{7}{6} d^{\frac{5}{6}}}} \right] dl \quad (14)$$

式中: de 为通信距离均匀变化的最远点; ds 为通信距离均匀变化的最近点; 这样在通信可通时间内传输的有效信息总量为:

$$We = W(1 - \overline{BER}) \quad (15)$$

由于无人机在飞行过程中存在位置上的波动,并且大气信道变化比较随机,会在光通信的过程中引入能量波动的随机误差 $Re(Re = Ra + Rp + Rb)$ ^[10]; Ra 主要由大气的随机性引发, Rp 主要是飞机飞行时的随机波动造成, Rb 主要是近地建筑物遮挡引起。

在不同空域飞行时,上述三种误差的主导作用区别较大,具体情况如表 1 所示。

表 1 随机误差

Tab.1 Random error

Flight altitude	Relationship
Ultra-low altitude	$Rb > Rp > Ra$
Low altitude	$Rb \approx 0; Rp > Ra$
Middle altitude	$Rb = 0; Rp \approx Ra$
High altitude	$Rb = 0; Rp < Ra$

由表 1 可知超低空飞行时, 信号受建筑物遮挡影响较大, R_b 起主导作用, 而此时通信信道长度较短, R_a 影响较小; 随着高度的增加, 遮挡影响逐渐减弱并趋于 0, 且随着通信大气信道距离的增加, 大气信道随机性引发的误差增长迅速, 超过 R_p 成为主导误差。三者在不同空域层次下的具体关系如表 1 所示。

此时有效信息总量表达式为:

$$W_e = W(1 - \overline{BER}) \pm Re \quad (16)$$

4.2 最佳通信高度确定

基于公式(16)及相关参数, 使用 MATLAB 对无人机在不同高度条件下与地面间的通信状况进行仿真, 如图 5 所示。

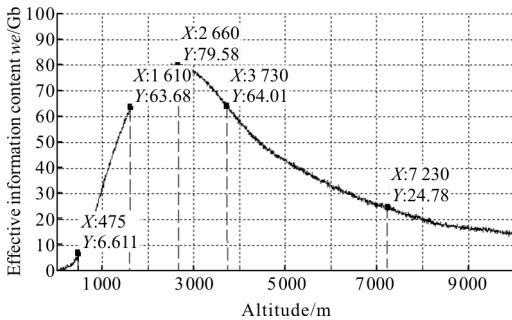


图 5 无人机不同高度通信状况仿真图

Fig.5 Simulation of UAV communication at different heights

由仿真结果可知, 在现有条件下, 无人机在高度为 2 660 m 左右的大气中对地面进行光通信效果最为理想, 此时无人机采用的是匀速平飞通过目标正上方的空域; 如果无人机变速通过或者是在通信过程中进行高度的变化, 这样不仅会消耗额外的能量, 还会使得大气对光信号的衰减影响变得更加随机, 不利于光通信的开展; 如果无人机在同样的高度条件下从目标的非正上方匀速通过, 但处于通信可通范围内, 如图 6 所示。

由图可知: 非正上方的通信路径 $D_1 <$ 正上方的通信路径 D , 所以在飞机飞行速度固定的条件下, 非正上方的通信可通时间 $t_1 <$ 正上方的通信可通时间 t ; 再者, 处于目标正上方区域通信的飞机, 其极限通信距离 $X_{lim} = d$, 最近通信距离 $X_{min} = H$, 平均通信距离 $\bar{X} = \frac{d+H}{2}$; 非正上方区域通行的飞机, 其极限通信距离 $X_{1lim} = d_1$, 最近通信距离 $X_{1min} = \sqrt{H^2 + r^2}$, 平均通信

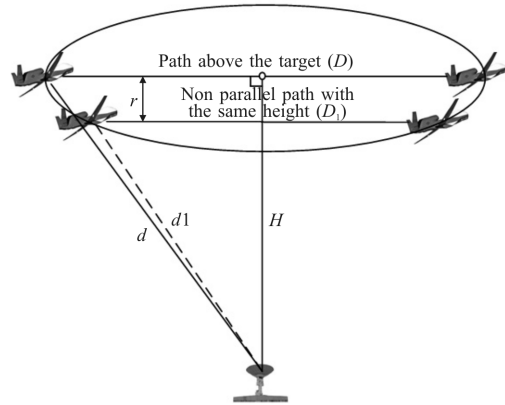


图 6 正上(非正上)方两种路径效果对比

Fig.6 Effect comparison between on the (non positive) side of the two paths

距离 $\bar{X}_1 = \frac{d_1 + \sqrt{H^2 + r^2}}{2}$; 因为 $d_1 = d = \sqrt{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}$, 所以 $\bar{X} < \bar{X}_1$, 这也是两种模式下大气平均衰减距离的关系式。因此对于非正上方的无人机通信信道而言: 其通信可通时间较正上方的信道短; 且整个通信过程中的平均大气衰减影响比正上方的要大, 因此该模式同样不利于光通信的进行。

综上所述: 无人机在地面接收站正上方飞过进行通信对于光通信的有效开展最为有利, 因此在对通信速率进行研究的过程中, 可以用该场景对应的情况对通信速率的下界进行限定。另外, 仿真结果中曲线存在随机波动, 这是光信号传输过程中随机误差作用的效果: 当飞行高度在 475 m 以下时, 由 R_b 和 R_p 引发的随机误差占主导地位, 此时曲线局部波动较大; 当飞行高度在 [475 m, 1610 m] 区间范围内时, $R_b \approx 0$; R_a 较小, R_p 影响相对较大, 曲线波动小; 当飞行高度超过 1 610 m 时, R_a 的影响逐渐增强, R_p 相对减弱, 曲线随机起伏加大。这也从另一个角度说明, 虽然通信高度的提高可以有效地增加通信可通时间, 增强无人机与地面目标通信时的隐蔽性, 但同时信道的增长会使得大气衰减影响变得异常强烈, 影响了信息传递的准确性。

由前述分析可知, 在无人机一般飞行参数确定的条件下, 在海拔 2 660 m 的飞行高度下进行机载光通信最为高效。因此模拟该高度条件下, 信息传输需求与光通信调制速率的关系, 就可以对现有条件下的无人机载光通信的通信速率要求有一个较为准确

的把握。

4.3 临界传输速率的仿真逼近

首先,在有效的光通信可通时间内,如果无人机采用按倍数梯度变化的通信调制速率进行大气衰减信道下的通信,倍率为 2,分别设定为:128、256、512 Mbps、1、2、4、8 Gbps。由通信可通时间内信息传输总量公式(9)可以仿真模拟出信号在通信可通时间内的信息传输总量,信息传输总量和大气衰减量仿真图见图 7;由平均衰减率公式(11)结合通信距离随时间的变化关系可以得到大气信息衰减量在不同时段内对通信时间的变化关系,见公式(17)。

$$\begin{cases} W_{S_1} = \overline{BER}_1 \cdot t + Re \\ de_1 = \frac{H}{\cos\theta} \\ ds_1 = \sqrt{H^2 + \left(\frac{v \cdot t_c}{2} - vt\right)^2} \end{cases} \quad t \leq \frac{t_c}{2}$$

$$\begin{cases} W_{S_2} = \overline{BER}_2 \cdot \frac{t_c}{2} + Re \\ de_2 = \frac{H}{\cos\theta} \\ ds_2 = H \end{cases} \quad t = \frac{t_c}{2}$$

$$\begin{cases} W_{S_3} = W_{S_2} + \overline{BER}_3 \cdot \left(t - \frac{t_c}{2}\right) + Re \\ de_3 = \sqrt{H^2 + \left(\frac{v \cdot t_c}{2} + vt\right)^2} \\ ds_3 = H \end{cases} \quad t > \frac{t_c}{2} \quad (17)$$

式中: W_s 为大气信息衰减量; t_c 为通信可通时间。结合前设参数可以仿真得到通信可通时间内大气衰减量随时间的变化关系。

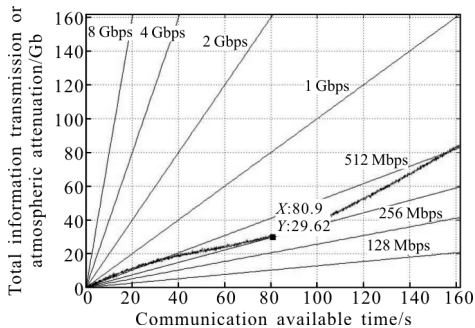


图 7 信息传输总量和大气衰减量仿真图

Fig.7 Simulation of total information transmission and atmospheric attenuation

由结果可知,大气衰减对信息的损失效应非常

明显。512 Mbps 的通信速率穿过大气衰减线;图中做出了与大气衰减线相切的通信速率线,切点坐标为 [80.9,29.62],斜率为 0.37,代表通信速率为 0.37 Gbps (379 Mbps)。低于该切线的通信速率无法弥补大气衰减的影响,通信无法正常进行;略微高于此的通信速率会部分穿过大气衰减线,使得穿过部分的时间段内可以进行有效的光通信;较高的通信速率线则会完全盖过大气衰减线的影响,使得整个通信可通时间内有效信息都能够被接收到,满足信息传输的需求。

为了进一步明确现阶段高速光通信调制速率的下限要求,需要设置向地面回传信息量的临界值。考虑现阶段机载对地大数据量信息回传的实际需求,设置该临界有效信息总量为 50 Gb^[11]。从前述 379 Mbps 的下限开始,以较小的递增间隔细化通信速率,同时兼顾速率点的代表性和计算的方便性,设置前四个通信速率点为 379、512、650、800 Mbps;后续四点以 0.2 Gbps 作为递增梯度进行划分,分别设置为:1、1.2、1.4、1.6 Gbps;另外在仿真图中加入 50 Gb 的临界线和通信可通半值线^[12],然后结合公式(16)、(17)进行有效传输信息总量 W_e 的仿真。仿真结果如图 8 所示。

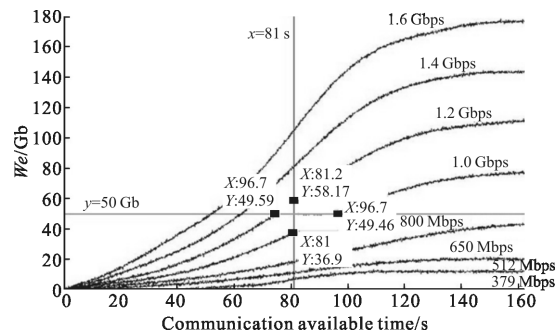


图 8 有效传输信息总量 W_e 仿真图

Fig.8 Simulation diagram of the effective transmission of information(W_e)

由仿真结果可知:379 Mbps 的通信调制速率对应的有效信息总量为 0,通信中断;512 Mbps 在 40 s 左右开始传输有效信息,之后信息传输量增长较为迅速,120 s 之后增长缓慢,进入增长停滞阶段,传输线趋于水平;800 Mbps 以上的通信速率都拥有完整的信息传输量线增长过程,可以发现在通信可通半值点之前有效信息线增长的瞬时速率越来越大,并在半值点附近达到增长速率的最大值;之后瞬时增

长率以近似与前半程反对称的方式减小。此外,1、1.2 Gbps 在通信可通半值点附近其有效信息传输总量超过临界回传信息量,这样能够保证在通信可通时间的后半段对传输信息进行反馈检验^[13],确保无误,有效提高光通信的精确性。因此文中寻求的光通信高速率调制的理论速率下限在 1 Gbps 和 1.2 Gbps 之间。进一步观察仿真结果,当通信调制速率超过 1 Gbps 时,随着速率按 0.2 Gbps 等间隔增长,半值点附近的有效信息总量也近似等幅增长。这样就可以由图中关键点数据及以下公式进一步锁定光通信临界速率点的位置。

$$u_{t,\text{lim}}=1 \text{ Gbps}+\Delta u \cdot \frac{Y_0-Y_2}{Y_1-Y_2} \quad (18)$$

式中: Δu 为递增梯度; Y_0, Y_1, Y_2 分别为两直线交点纵坐标及通信可通半值线在该交点上、下与有效信息量线的交点纵坐标;其中:

$$\Delta u=0.2 \text{ Gbps}; Y_0=50 \text{ Gb}; Y_1=5817 \text{ Gb}; Y_2=36.9 \text{ Gb}$$

代入上式可求得: $u_{t,\text{lim}}=1.12 \text{ Gbps}$ 。

由此在信道模型建立、相关参数及大数据传输临界信息量确定的基础上,将无人机高速光通信的调制速率下限需求锁定在 1.12 Gbps。

5 结 论

文中通过对无人机载光通信大气信道模型的建立,对整个通信过程进行了定量化的分析。

首先根据常用飞行器空域划分,将无人机对地光通信的大气影响要素限定在对流层内,提高了问题的针对性;通过对对流层内典型大气效应的综合建模,明确了大气主要参数对光通信的影响效果;在此基础上建立了无人机对地光通信中重要指标在大气信道下的模型;结合信道模型和无人机相关参数,仿真得到了无人机光通信的最佳高度为 2 660 m;在此基础上,通过临界有效信息总量的设置、通信系统反馈检验需求的明确及进一步的仿真研究,最终将现阶段无人机有效遂行大数据量信息传输的临界调制速率指标锁定为 1.12 Gbps,为现有条件下开展无人机对地光通信提供了指标参考,同时也为光通信调制系统的设计提供了评估标准。

参考文献:

[1] Rian Marchant, Mohsen Kavchrad. Channel modeling of light

signals propagating through battlefield environment: analysis of channel spatial, angular and temporal dispersion [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(25): 6442-6448.

- [2] Jin Shi, Zhang Xiaolin, Zhou Qi. Statistical model of UAV communication channel [J]. *Aeronautical Journal*, 2004, 25 (1): 62-65. (in Chinese)
- [3] Xu Huayi, Zhou Shengkui, Zhu Qiuming, et al. UAV communication channel simulation based on flight trajectory [J]. *Telecommunications Technology*, 2013, 53(5): 656-660. (in Chinese)
- [4] Fan Zhaobo, Lu Ping, Zhen Yunhui. Analysis and modeling of UAV channel based on Turbo codes research [J]. *Aeronautical Computing Technology*, 2008, 38(5): 69-72. (in Chinese)
- [5] Chen Mu, Ke Xizheng. Study on the effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822009. (in Chinese)
- [6] Ai Yong, Duan Mengyun, Xu Jiejie, et al. Atmospheric turbulence simulation and communication experiment analysis of LC-SLM laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3104-3106. (in Chinese)
- [7] Wu Junpeng, Liu Quan, Yu Lintao. Performance analysis of partially coherent optical communication system in Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0322004. (in Chinese)
- [8] Xu Lei. The research and simulation of the atmospheric channel and the signal modulation format in optical communication system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
- [9] Kong Meiwei, Tong Zheng, Yu Xiangyu, et al. Airborne wireless optical communication system in low altitude using an unmanned aerial vehicle and LEDs [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 679(1): 15-17.
- [10] Kamran Kiasaleh. Statistical profile of Hermite-Gaussian beam in the presence of residual spatial jitter in FSO communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(4): 656-660.
- [11] Robert Bruning, Bienvenu Ndagano, Melanie McLaren, et al. Data transmission with twisted light through a free-space to fiber optical communication link [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 3-6.
- [12] Lim W. BER Analysis of coherent free space optical systems with BPSK over Gamma-Gamma channels[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2015, 23(2): 17-18.
- [13] Salton G. Improving retrieval performance by relevance feedback [J]. *Journal of the American Society for Information Science*, 2010, 15(1): 44-47.