

海面空-空无线信道特征*

董宇良^{1,2}, 雷菁¹, 黄英¹, 李为¹

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要:针对海上远距离通信场景,基于无人机之间的无线通信链路,对接收功率进行实际测量。在大尺度路径损耗方面,采用对数距离线性模型进行拟合,分析海上远距离空-空无线信道特征,获取路径损耗指数,并采用射线跟踪方法进行仿真验证,通过仿真所得信道冲激响应在多径时延和功率方面分析产生接收功率快速变化的原因。分析结果表明,近岸的多径反射会造成接收功率的波动,并且会造成路径损耗的升高。利用三种分布函数对测量数据进行分布拟合,分析海面和近岸两种通信条件下空-空无线信道的小尺度分布特征。测量分析结果表明,小尺度特征受陆地反射影响明显,在距离陆地较远的海面呈现高斯分布特征,而在近陆地处未呈现典型分布特征。

关键词:空-空无线信道;特征提取;信道建模;路径损耗;小尺度分布

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2023)02-081-06

Characteristics of air-to-air wireless channel in sea scenario

DONG Yuliang^{1,2}, LEI Jing¹, HUANG Ying¹, LI Wei¹

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Beijing Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100074, China)

Abstract: For the remote communication scenario of UAV (unmanned aerial vehicle) at sea, the received power was measured on the basis of the wireless communication link between UAVs. In terms of large-scale path loss, the logarithmic distance linear model was used to fit the measurement data. The characteristics of remote air-to-air wireless channel at sea were analyzed, and the path loss index was obtained. The ray tracing method was used to simulate and verify the measurement results. Through the simulation of channel impulse response, the reasons for the rapid change of received power were analyzed in terms of multipath delay and power. The analysis results show that the multipath reflection in the nearshore causes the fluctuation of the received power and increases the path loss. Three kinds of distribution functions were used to fit the measured data, and the small-scale distribution characteristics of air-to-air wireless channel under sea surface and inshore communication conditions were analyzed. The analysis of the measurement results shows that the small scale characteristics are significantly affect by the land reflection, showing Gaussian distribution characteristics at the sea surface far from the land, but not typical distribution characteristics near the land.

Keywords: air-to-air wireless channel; feature extraction; channel modeling; path loss; small scale distribution

海洋是未来无人机应用的重要领域,无论是对于海上搜救或是海上中继通信,无人机具有长航时、高空飞行特性稳定等无与伦比的应用优势。随着无人机技术的快速发展,研究保障无人机间无线链路通信质量的物理层关键技术成为一个亟待解决的重要问题。而物理层技术发展的核心驱动力是对特定场景无线信道特征的掌握和利用。

目前已有部分文献对多种复杂场景空-空无线信道特征做出研究。Supramongkonset 等通过测量得出在 2.4 GHz 频率条件下,大尺度路损模型可以采用对数距离线性模型描述的结论,同时

指出空-空无线信道符合自由空间传播特征^[1]。路径损耗指数可参考的值有 1.92、2.05、2.03 等^[2]。文献[3-8]在小尺度特征方面进行了研究,均采用莱斯分布拟合数据,莱斯 K 因子为 10~15 dB;在多径时延特征方面,得出不同时延的多径比直射径小 6 dB、12 dB、18 dB,最大的多径时延为 570 ns。文献得出的无线信道特征具有很好的参考意义,但是其飞行场景局限在低空近距离通信,无法将该信道特征迁移至远距离无人机通信场景。另外在文献[9-11]中指出空-空无线信道中,机体可以引发一部分阴影衰落,范围可达

* 收稿日期:2021-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61702536);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3609)

作者简介:董宇良(1983—),女,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,博士研究生,E-mail:yuliangtea@163.com;

雷菁(通信作者),女,陕西西安人,教授,博士,博士生导师,E-mail:leijing@nudt.edu.cn

5 ~ 20 dB。该测量值为经验值,针对不同飞机和频段会有较大差异。

Walter 等采用两架飞机对四种地面场景在 250 MHz 频率下的空 - 空信道做了测量^[12]。飞行高度 600 m,场景分为:海面、山谷、城区、草原。针对四种场景下的小尺度特征采用了四种不同的分布对直射径和反射径进行拟合。文献[13 - 14]总结了在 S 波段和 C 波段的典型无人机空 - 空信道测量参数值。测量信号包括 OFDM、MSK 等信号。测量结果指出在海上可以建模成双射线模型,包含直射径 + 海面反射多径。

澳大利亚 Joanneum 研究所、西班牙 Vigo 大学和德国航空局受欧洲太空总署(European space agency, ESA)委托联合进行测量并提出 1.95 GHz ESA-SDS (ESA signal design and transmission study)信道模型^[15]。该信道模型包含一条直射路径和一条反射路径,此外还有一条缓慢变化的机翼反射路径及一条快速变化的地面反射路径。基于该模型,文献[16 - 17]对不同飞行情景、飞机动力学、飞行器选择和天线结构等进行了更为详细的改进。

文献[18 - 19]提出了几种基于几何的随机无线信道建模方法的空 - 空无线信道模型,主要根据采用几何模型划分散射区域的办法来进行建模,但通信双方的距离一般较短且海拔高度较低。

虽然已有文献对空 - 空无线信道特征进行了大量的测量和建模,但对于远距无人机通信场景尚未见文献报道。相比于近距离通信,无人机在进行远距无线通信时,飞行高度与通信距离相比可以忽略;而由于发射功率较大,发射机或接收机所处的地理环境造成的反射和散射在功率和时延上不可忽略。因此有必要针对远距无人机通信场景信道特征进行测量和分析。本文以此为出发点,基于近海远距无人机通信的功率测量结果,分析该场景下大小尺度信道特征,并采用射线跟踪方法^[20 - 21]进行验证。

1 空 - 空无线信道测量

1.1 测量路线及测量参数

本次测量的地点位于中国渤海地区,测量路线和无人机之间通信距离如图 1 所示。测量的发射机和接收机分别搭载于两架无人机上。两架无人机飞行高度约 2 500 m,无人机 1 位于渤海上空,无人机 2 位于山东烟台沿海地区。

测量信号采用直接序列扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS)信号。测量参数如表 1



图 1 测量无人机飞行轨迹
Fig. 1 Measuring aircraft flight path

所示。

表 1 信道测量参数
Tab. 1 Channel measurement parameters

测量参数	数值
测量频段	S
测量带宽	5 MHz
发射功率	46 dBm
发射机天线增益	7 dBi
接收机天线增益	7 dBi

1.2 测量数据

本次测量所获有效测量数据为 2 组,分别对应时长为 34 s、90 s,功率测量值数量为 4 552、11 429,具体测量数据如图 2、图 3 所示。本次测量所获取的数据均为波束稳定同步后的测量数据。其中 B 组数据在测量过程中角度变化最大,但也仅约为 3.4°,因此测量过程中的角度变化对波束同步和接收功率的影响可以忽略。

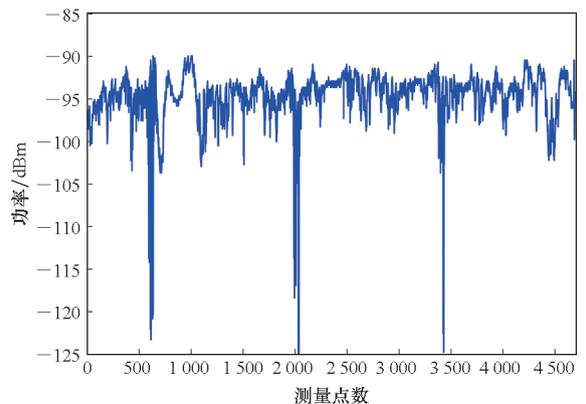


图 2 A 组 34 s 接收功率
Fig. 2 Received power of group A in 34 s

以上 2 组功率测量结果中,A 组处于更远的位置,飞行轨迹远离陆地,接收功率的组成部分包含直射径和来自海面的反射多径、部分散射多径。

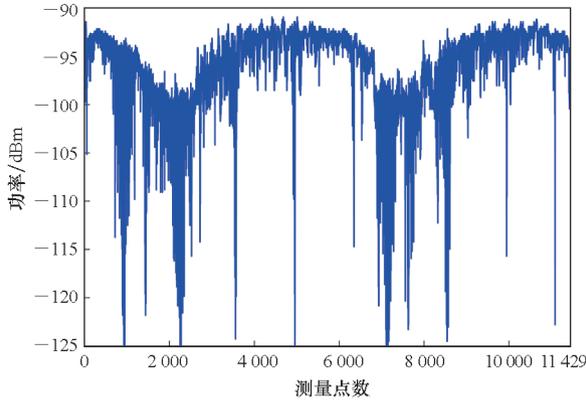


图3 B组90 s接收功率

Fig. 3 Received power of group B in 90 s

B组的飞行轨迹更靠近陆地,最近距离为36 km,因此其接收功率中包含直射径、来自海面 and 陆地的反射与散射多径。通过对比可以发现,B组中来自地面的反射会对接收信号造成十分明显的衰落影响。这种影响可以通过收发机之间的路径损耗来进行分析。

2 空-空无线信道大尺度路径损耗特征

在分析路径损耗之前需要对测量结果进行数据清洗,剔除测量坏值。通过观察图2和图3中数据可以发现,所测接收功率呈现一定周期性的深衰,其间隔约为1400个采样点,对应时间间隔约为10 s,与收发机所采用基于信号强度进行天线指向调整的时间一致,在此过程中会造成信号的短时深衰。因此数据中这类深衰点应予以剔除。

为获得路径损耗拟合值,首先要获取收发机对应位置的发射功率和接收功率,以及信号传播距离。其传播距离通过收发机的经纬度计算得到。设经度为 θ ,纬度 ϕ ,将经纬度转化为空间直角坐标系有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos(\theta') \cos(\phi') \\ R \cos(\theta') \sin(\phi') \\ R \sin(\theta') \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R = r + h$ 为无人机距离地心的距离, $r = 6371$ km为地球半径, h 为无人机距地面的高度。 θ' 和 ϕ' 分别为以弧度为单位的经纬度坐标:

$$\theta' = \frac{\theta \times \pi}{180^\circ} \quad (2)$$

$$\phi' = \frac{\phi \times \pi}{180^\circ} \quad (3)$$

将无人机1经纬度和高度代入式(1)得向量 $\mathbf{A} = [x_{Tx} \ y_{Tx} \ z_{Tx}]^T$,将无人机2经纬度和高度

代入式(1)得向量 $\mathbf{B} = [x_{Rx} \ y_{Rx} \ z_{Rx}]^T$,则收发机之间的距离为:

$$d_{T-R} = \sqrt{(x_{Tx} - x_{Rx})^2} + \sqrt{(y_{Tx} - y_{Rx})^2} + \sqrt{(z_{Tx} - z_{Rx})^2} \quad (4)$$

路径损耗由式(5)获得:

$$P_L = G_{Tx} + G_{Rx} + P_{Tx} - P_{Rx} \quad (5)$$

式中, P_L 为路径损耗, G_{Tx} 和 G_{Rx} 分别为发射天线与接收天线的增益, P_{Tx} 和 P_{Rx} 分别为发射功率和接收功率。

首先提取A组数据路径损耗特征。通常对路径损耗进行拟合时多采用式(6):

$$P_L = P_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0) \quad (6)$$

式中, d_0 为参考点距离, $P_L(d_0)$ 为参考点的路径损耗值, d 为收发机之间的直线距离, n 为路径损耗指数。

一般 d_0 为靠近发射机的参考点距发射机的距离,其典型值为100 m。然而,本次测量的飞行轨迹相距较远,并不能在距离发射机较近的位置获得接收信号,因此在路径损耗的拟合中,采用距离发射机最近的位置为参考点。在A组数据中 d_0 为306 835 m,B组数据中 d_0 为247 448 m。

在34 s和90 s的飞行过程中,高空机一共飞行了约5 200 m和14 902 m。相比于 d_0 ,无人机飞行的距离相对较小,因此拟合曲线的参数估计值受 $P_L(d_0)$ 影响很大,若在拟合公式中只采用 d_0 位置的对应测量值作为截距,路损指数 n 的估计值偏差会很大。为了克服这一问题,应当在测量数据中选取具有代表性的 $P_L(d_0)$ 值进行拟合,本文采用局部均值来作为 $P_L(d_0)$ 。在A、B两组中分别选取前100个路损值的均值作为 $P_L(d_0)$ 。经统计,A、B两组的 $P_L(d_0)$ 分别为154.2 dB、155.6 dB。将两个值分别代入式(6)中并采用最小二乘法进行线性拟合,分别得到两组数据的路径损耗指数为2.476和4.1,拟合结果如图4和图5所示。

就本次测量而言,考虑根据A、B两组数据的均值之差再结合A、B两组数据的距离来估算路径损耗,以便与A、B两组数据分别进行路径损耗拟合的结果进行比对。但是从A、B两组数据路径损耗的大小来看,A组的收发机距离比B组的收发机距离远50 km,而路径损耗更小。在相同的测量参数下产生这种结果说明A、B两组数据所处传播环境中的多径类型有较大差别。因此无法采用这种办法进行路径损耗的估算。

A组数据的距离跨度约为5 km,在这段距离

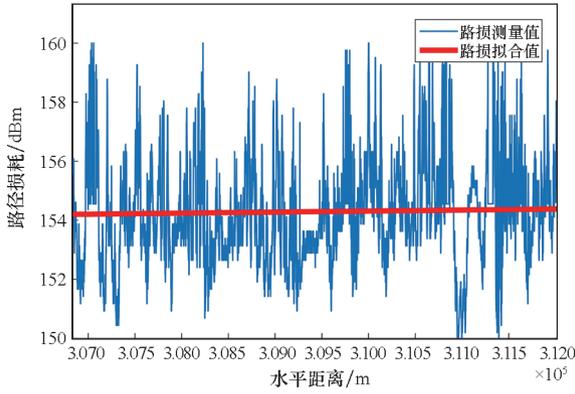


图 4 A 组实际测量与拟合路径损耗

Fig. 4 Measured and fitted path loss of group A

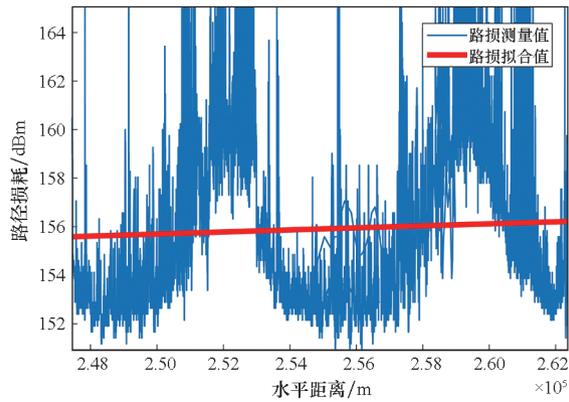


图 5 B 组实际测量与拟合路径损耗

Fig. 5 Measured and fitted path loss of group B

内收发机之间路径损耗的波动在 10 dB 左右且变化趋势较为平稳。根据地球表面最大无线电视距计算公式,如式(7)所示, d_{LOS} 约为 412 km,大于测量距离 300 km,具有良好的可视条件。

$$d_{LOS} = 4.12 \cdot (\sqrt{h_{Tx}} + \sqrt{h_{Rx}}) \quad (7)$$

式中, h_{Tx} 为发射机距地表高度, h_{Rx} 为接收机距地表高度。

因此拟合所得路径损耗因子相比自由空间略大,说明在测量条件下,收发机之间直射径不受遮挡,而且来自海面的反射径对接收功率影响不显著。虽然多径对功率的衰减并不起决定性作用,但是仍然会造成接收功率在 10 dB 以内快速变化,对接收机同步跟踪环路会造成一定影响。

为查找影响接收功率快速变化的多径来源,采用了射线跟踪仿真方法获得了如图 6 所示的仿真结果。仿真设置参数为:反射多径数量 10 条,反射次数 2 次。

对比测量结果和仿真结果可以看出,二者不仅在数值趋势上保持一致,射线跟踪法对于测量数据的局部变化特征也能够较好地复现。因此仿

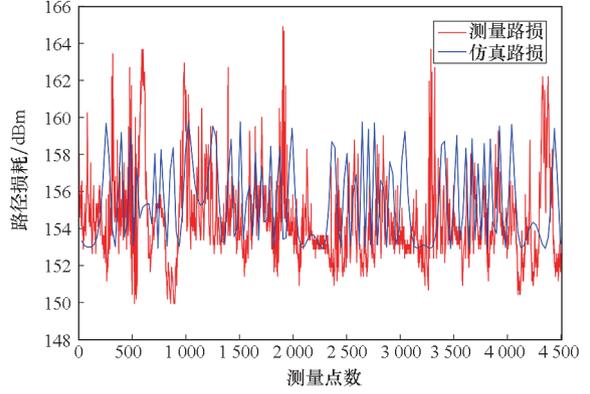


图 6 A 组实际测量与仿真接收功率

Fig. 6 Measured and simulated received power of group A

真的多径特征可以为还原真实传播的多径做很好的参考。

射线跟踪仿真获得的冲激响应如图 7 所示。由图中可以看出,较少的多径即可对实际测量数据进行很好的模拟。

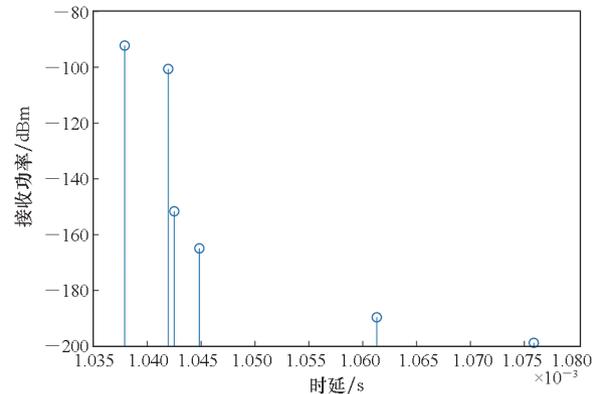


图 7 仿真冲激响应

Fig. 7 Simulated channel impulse response

图中除了直射径之外,还有来自地面的强多径反射,这是因为无人机 2 的飞行轨迹位于沿海岸边,存在来自海岸附近起伏地形的反射信号。该反射信号与直射径的路径差约 1.5 km,仍然会造成接收信号的快速变化。

B 组数据的距离跨度约为 14 km,由图 5 中可以看出,在这段距离内路径损耗短时间起伏较大、变化剧烈。按照良好可视条件的推测,B 组数据相比 A 组数据两无人机之间距离更近,相差约 50 km,其路径损耗应当比 A 组更小。按照自由空间传播损耗推算,如式(8)所示,在该通信频段,B 组数据路径损耗比 A 组小约 1.5 dB。

$$P_{L_{\text{free space}}} = 32.44 + 20\lg(d) + 20\lg(f) \quad (8)$$

式中, f 为电磁波频率。

但是从实际测量结果中可以发现,B 组数据路径损耗略大,处于深度衰落值更多,这也能够

在拟合结果中体现出来,其路径损耗指数为 4.1,功率衰减速度为自由空间损耗的 2 倍,接近典型双径模型路径损耗因子。

需要指出的是,该拟合结果是对整体测量数据的拟合,这里包含了路径损耗的大幅波动,若是对测量结果的路径损耗进行局部分析,其路损因子会在较大范围内波动。而造成这种剧烈波动的原因主要是,B 组数据飞行轨迹更靠近陆地,来自地面的反射与直射信号叠加后会呈现相长或相消的特征,同时还伴随着剧烈波动。

3 空-空无线信道小尺度分布特征

无线信道小尺度特征反映的是多径信号的叠加特性。在蜂窝小区中往往采用瑞利或莱斯分布来描述无线信道的小尺度特征,因为在地面上发射机和接收机所处的环境有一定的区域受限特性,多径信号多来自周围几千米内的散射物,因此在有密集散射物存在时多径叠加后往往呈现瑞利分布特征;若存在直射径,与反射径叠加后会呈现莱斯分布特征。

空-空远距离无线信道与地面无线信道不同,影响多径分布特征的并非是来自周围局域反射多径。若两无人机存在可视条件,除直射径外,还有来自海面杂波的反射、海面水蒸气对直射径的散射,以及来自陆地的反射。同时无人机处于飞行状态,各个来源不同的多径分量变化特征较为独立,因此一定程度上缺少瑞利或莱斯分布形成的条件。

诸多因素都会影响多径叠加的结果,因此需要对空-空无线信道的小尺度分布特征进行统计分析。如图 8 和图 9 所示,分别采用了高斯分布、对数正态分布、威布尔分布对 A、B 两组数据进行了拟合。

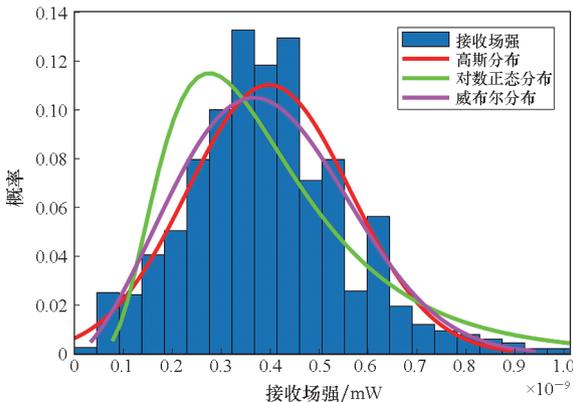


图 8 A 组小尺度分布拟合值

Fig.8 Fitting values of small scale distribution in group A

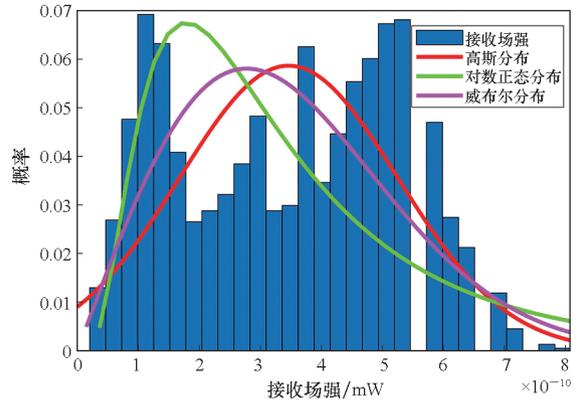


图 9 B 组小尺度分布拟合值

Fig.9 Fitting values of small scale distribution in group B

高斯分布的概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式中, μ 为服从高斯分布的随机变量的均值, σ 为此随机变量的标准差。

对数正态分布的概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

式中, μ 为对数服从高斯分布的随机变量的均值, σ 为此随机变量的标准差。

威布尔分布概率密度函数公式如下:

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, x 是随机变量, $\lambda > 0$ 为尺度参数, $k > 0$ 为形状参数。

通过式(12)来衡量三种分布的匹配程度:

$$\sigma_{\text{match}}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\int_{(i-1)W_{\text{bar}}}^{iW_{\text{bar}}} p_e - p_i \right)^2 \quad (12)$$

其中, p_e 为目标分布的概率密度, p_i 为直方图中各个统计区间的概率, W_{bar} 为统计区间宽度。表 2 中为计算得到的 σ_{match}^2 值。

表 2 分布拟合精确度

Tab.2 Distribution fitting accuracy

测量数据	高斯分布	对数正态分布	威布尔分布
A 组	1.17×10^{-6}	3.75×10^{-6}	1.412×10^{-6}
B 组	1.14×10^{-7}	1.32×10^{-7}	0.147×10^{-7}

从图 8 和表 2 中可以看出,A 组数据比较符合高斯分布和威布尔分布。而从图 9 和表 2 可以看出,B 组数据由于来自地面多径的影响,在 90 s 测量周期内出现周期性上升和下降的变化,导致其分布不具有典型的分布特征。与 A 组相比,无

论是哪一种分布都不能很好地拟合测量值,其中威布尔分布最接近测量值。B 组数据在短时间内呈现的双峰值分布特征会对接收机的自动增益控制模块、同步模块有较大的影响。

4 结论

1) 通过 A、B 组路径损耗的相比,并采用射线跟踪法进行仿真验证,可以发现,虽然远距无人机通信大体服从近似自由空间传播损耗,但来自近海陆地的反射会造成接收功率的大范围快速变化,甚至在局部造成深度衰落。

2) 由于收发机通信距离较远,发射机或接收机附近来自地面的反射影响在时延和功率上不可忽略且快速变化,造成接收信号小尺度特征在海面呈现高斯分布特征,在近陆地处呈现非典型分布特征。

以上无人机远距通信场景下信道特征会给接收机自动增益控制模块以及同步模块带来较大影响,因此针对该通信场景进行更广泛的信道测量十分必要。

参考文献 (References)

- [1] SUPRAMONGKONSET J, DUANGSUWAN S, MAW M M, et al. Empirical path loss channel characterization based on air-to-air ground reflection channel modeling for UAV-enabled wireless communications[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021: 1–10.
- [2] KHUWAJA A A, CHEN Y F, ZHAO N, et al. A survey of channel modeling for UAV communications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2804–2821.
- [3] BELLIDO-MANGANELL M A, FIEBIG U C, WALTER M. Aircraft-to-aircraft channel measurements in the VHF/UHF band; analysis of the line-of-sight and lake-reflected channel components [C]// *Proceedings of IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*, 2022: 1–7.
- [4] ZHU Z, SU G, CHEN B, et al. Joint trajectory and power control for secure dual-UAV communications against air and ground eavesdropping[C]// *Proceedings of the 31st Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*. IEEE, 2022: 175–180.
- [5] KIM M, TAKAHASHI R, TSUKADA H. Millimeter-wave cluster channel model validation from small-scale fading measurements [C]// *Proceedings of IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2022: 1–5.
- [6] GUO C, KHATUN M, BERNTSEN T, et al. Omnidirectional small-scale fading models in an airport environment at millimeter-wave frequency bands; 73 and 81 GHz [C]// *Proceedings of IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021–Fall)*, 2021: 1–5.
- [7] YU J, CHEN W, LI F, et al. Channel measurement and modeling of the small-scale fading characteristics for urban inland river environment[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3376–3389.
- [8] FAN T, CHEN W, LI C, et al. Small scale characteristics analysis on highway V2V channel for intelligent transportation systems [C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2019: 789–793.
- [9] MATOLAK D W, SUN R Y. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part I: methods, measurements, and models for over-water settings[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 26–44.
- [10] MENG Y S, LEE Y H. Study of shadowing effect by aircraft maneuvering for air-to-ground communication [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2012, 66(1): 7–11.
- [11] KUNISCH J, DE LA TORRE I, WINKELMANN A, et al. Wideband time-variant air-to-ground radio channel measurements at 5 GHz [C]// *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2011.
- [12] WALTER M, SCHNELL M. Statistical distribution of line-of-sight and reflected path in the aeronautical channel [C]// *Proceedings of IEEE/AIAA the 30th Digital Avionics Systems Conference*, 2011.
- [13] ONO F, KAGAWA T, TSUJI H, et al. Measurements on C-band air-to-air channel for coexistence among multiple unmanned aircraft systems[C]// *Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2017.
- [14] TAKIZAWA K, ONO F, SUZUKI M, et al. Measurement on S-band radio propagation characteristics for unmanned aircraft systems [C]// *Proceedings of the 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, 2014.
- [15] STEINGASS A, LEHNER A, PÉREZ-FONTÁN F, et al. The high resolution aeronautical multipath navigation channel [C]// *Proceedings of the National Technical Meeting, Institute of Navigation*, 2004.
- [16] STEINGASS A, LEHNER A, PÉREZ-FONTÁN F, et al. Characterization of the aeronautical satellite navigation channel through high-resolution measurement and physical optics simulation [J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2008, 26(1): 1–30.
- [17] RICE M, DAVIS A, BETTWEISER C. Wideband channel model for aeronautical telemetry [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 57–69.
- [18] ZHANG Y, ZHOU Y, JI Z, et al. A three-dimensional geometry-based stochastic model for air-to-air UAV channels [C]// *Proceedings of IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, 2020: 1–5.
- [19] MAO X, WANG C X, CHANG H. A 3D non-stationary geometry-based stochastic model for 6G UAV air-to-air channels [C]// *Proceedings of 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. IEEE, 2021: 1–5.
- [20] SUN R C, MATOLAK D, TAO C, et al. Investigation of MIMO channel characteristics in a two-section tunnel at 1.4725 GHz [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 2017: 3693149.
- [21] SUN R C, LEI Y C, CHEN Z M, et al. Investigation of MIMO channel characteristics in tunnel at 1.4725 and 6 GHz. [J]. *Radio Science*, 2020, 55(10): e2020RS007063.