

文章编号: 2095-4980(2024)12-1320-04

海上太赫兹通信系统设计

刘 宁, 崔冠峰, 宋瑞良, 尚国涛

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 河北 石家庄 050071)

摘 要: 海面舰艇间及舰艇与飞行器间存在大容量、抗干扰安全可靠传输需求, 太赫兹频段频率高, 带宽大, 是大容量传输和抗干扰通信的优良手段。针对海上太赫兹通信的特点, 分析了我国海面上太赫兹波受水汽衰减的影响; 在链路预算与传播可靠度计算的基础上, 设计了一套海上太赫兹通信系统, 并经过 150 m 水上实测。在误码率满足 2×10^{-8} 的情况下, 速率可达 520 Mbps, 验证了系统的可行性。

关键词: 太赫兹; 海上通信; 水汽衰减

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024237

Design of marine terahertz communication system

LIU Ning, CUI Guanfeng, SONG Ruiliang, SHANG Guotao

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050071, China)

Abstract: The demand for high-capacity, anti-interference, safe and reliable transmission between ships on the sea and between ships and aircraft is becoming urgent. Terahertz band has a high frequency band and large bandwidth, making it an excellent means of high-capacity transmission and anti-interference communication. Based on the characteristics of marine terahertz communication, the influence of water vapor attenuation on terahertz wave on the sea surface in China is analyzed firstly. Then, based on the link budget and propagation reliability calculation, a marine terahertz communication system is designed. After being tested on a 150 m river, the system's feasibility is verified by achieving a speed of 520 Mbps with an bit error rate of 2×10^{-8} .

Keywords: terahertz; marine communication; water vapor attenuation

随着现代通信技术的快速发展, 海上舰艇与舰艇之间以及舰艇与空中飞行器之间的大容量抗干扰安全通信变得越来越迫切^[1-2]。太赫兹频段具有频率高、带宽大的特点, 是大容量传输和抗干扰通信的优良手段。本文针对海上太赫兹通信的特点, 设计了一套海上太赫兹通信系统。

1 系统链路预算与分析

海上太赫兹通信系统与陆地通信系统的主要区别在于太赫兹频段受水汽衰减影响大^[3-4], 在系统设计前需进行细致的链路预算与分析。

1.1 水汽影响分析

根据 ITU-R P.836-6 《水蒸汽: 地表密度和气柱总含量》计算水汽密度^[5]。以 9—10 月为例, 水汽分布密度如图 1 所示。可以看出, 在中国海域, 9 月份渤海、黄海、东海水汽密度基本在 15 g/m^3 左右, 南海水汽密度基本在 20 g/m^3 左右; 10 月渤海、黄海水汽密度基本在 10 g/m^3 左右, 东海、南海水汽密度基本在 15 g/m^3 左右。本系统设计中水汽密度采用 15 g/m^3 计算。

根据 ITU-R P.676-7 《无线电波在大气气体中的衰减》附件 2 《在 1~350 GHz 频率范围内的无线电波在大气气体中衰减的近似计算》^[6], 在海平面至 10 km 高度范围内, 对于干燥空气, 大气衰减 γ_0 (dB/km) 计算如下:

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-07-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFE0202500)

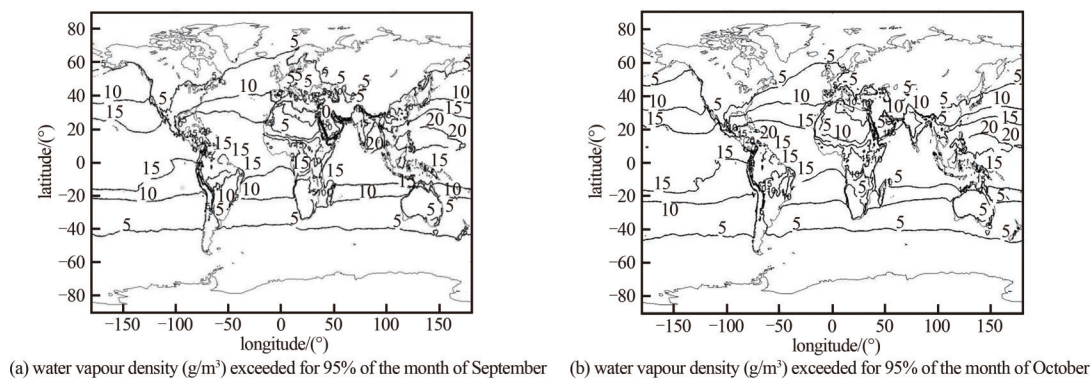


Fig.1 Water vapor density distribution on September and October

图 1 9-10月水蒸汽密度分布

对于 $66 \text{ GHz} < f \leq 120 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \left\{ 3.02 \times 10^{-4} r_i^{3.5} + \frac{0.283 r_i^{3.8}}{(f-118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_i^{1.6}} + \frac{0.502 \xi_6 [1 - 0.016 3 \xi_7 (f-66)]}{(f-66)^{1.434 6 \xi_4} + 1.15 \xi_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: $r_p = p/1013$, p 为压强; $r_t = 288/(273+t)$, t 为温度, 当缺少当地的温度数据时, 可从 ITU-RP.1510 建议书中的地图上获取温度中值; $\xi_4 = \phi(r_p, r_t, -0.011 2, 0.009 2, -0.103 3, -0.000 9)$; $\xi_5 = \phi(r_p, r_t, 0.270 5, -2.719 2, -0.301 6, -4.103 3)$; $\xi_6 = \phi(r_p, r_t, 0.244 5, -5.919 1, 0.042 2, -8.071 9)$; $\xi_7 = \phi(r_p, r_t, -0.183 3, 6.558 9, -0.240 2, 6.131)$; $\phi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1-r_p) + d(1-r_t)]$, a, b, c, d 为计算过程中参数常量。

对在水汽中的衰减, 大气衰减值 γ_w 计算如下:

$$\gamma_w = \left\{ \frac{3.98 \eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42 \eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11.96 \eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14 \eta_1^2} + \frac{0.081 \eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29 \eta_1^2} + \frac{3.66 \eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22 \eta_1^2} + \right. \\ \left. \frac{25.37 \eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4 \eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} + \frac{844.6 \eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \right. \\ \left. \frac{290 \eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f, 752) + \frac{8.332 8 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} f^2 r_i^{2.5} \rho \times 10^{-4} \quad (2)$$

式中: $\eta_1 = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho$, ρ 为水汽密度; $\eta_2 = 0.735 r_p r_t^{0.5} + 0.035 3 r_i^4 \rho$; $g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f-f_i}{f+f_i} \right)^2$, f_i 为计算 $g(f, f_i)$ 辅助参数常量。

由于海平面水汽蒸发量较大, 108 GHz 衰减较小, 系统具有更大的余量, 尤其是在倾角比较低的情况下; 同时 108 GHz 器件成熟度较高, 具有更大的输出功率, 因此本系统选择 108 GHz 作为太赫兹无线通信系统的载频。将频率 $f = 108 \text{ GHz}$ 、大气压强 $p = 1013 \text{ hPa}$ 、温度 $t = 15^\circ \text{C}$ 、水汽密度 $\rho = 15 \text{ g/m}^3$ 代入计算, 得到干燥空气大气衰减值为 $\gamma_o = 0.04 \text{ dB/km}$, 水汽衰减值为 $\gamma_w = 1.37 \text{ dB/km}$, 海平面大气总的衰减值为 $\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 1.41 \text{ dB/km}$ 。通过实验, 气压和温度对衰减值影响不大。

1.2 链路计算

本系统在基带上采用正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 调制、低密度奇偶校验码 (Low Density Parity Check codes, LDPC) 编码, 链路预算情况如表 1 所示。

1.3 计算传播可靠度

跨海微波传输会造成多径衰落, 可根据 GB/T14617.3-2012《陆地移动业务和固定业务传播特性 第 3 部分: 视距微波接力通信系统传播特性》计算电波传播可靠度^[7]:

$$p = 1 - \frac{K_1}{(10 + \sqrt{\Delta h})} f^{1.3} d^{3.1} \times 10^{-F_d/10} \quad (3)$$

式中： Δh 为两天线相对高度差(单位为m)， $\Delta h = |h_2 - h_1|$ ； F_d 为衰落储备(单位为dB)； K_1 为地形和气候条件因子。根据我国的情况，划分为以下4种类型地形：山区(DM1型)， $K_1 = 6 \times 10^{-5}$ ；丘陵地带(DM2型)， $K_1 = 1.26 \times 10^{-4}$ ；平原地带(DM3型)， $K_1 = 6 \times 10^{-4}$ ；跨海电路，衰落严重的水面电路(DM4型)， $K_1 = 3.25 \times 10^{-3}$ 。

假设两天线高度差为0，将DM4型参数代入，可求得传播可靠度如表2所示。从表2可以看到，由于多径衰落，在不增加分集设备和其他信号处理的条件下，108 GHz信号可以传输10 km。

2 通信系统组成

海上太赫兹通信系统组成如图2所示，由基带、射频和天线分系统组成，系统采用500 MHz带宽，拟在误码率优于 10^{-6} 的情况下达到500 Mbps以上速率。THz射频分系统包括发射支路和接收支路。为实现THz系统的数据传输，需将调制器输出的已调制中频信号上变频至所需THz频段后经天线发射，完成发射功能；接收支路接收天线送达的THz信号，经低噪声放大、下变频、滤波后送至中频的解调端；本振为发射支路和接收支路提供本振信号，完成系统的上下变频功能^[8-10]。与其他太赫兹通信系统相比，海上太赫兹通信系统在通信时，海况条件比较复杂，船体可能处于不断摆动中；同时太赫兹波束较窄，需结合太赫兹波束跟踪设计解决平台稳定性问题，并实现信号的精确捕获和稳定跟踪。通信系统演示用天线为增益25 dB的喇叭天线，采用机械伺服系统进行系统演示。随太赫兹多通道多功能器件的发展和成熟，未来可采用太赫兹相控阵天线更好地解决船载情况下信号捕获和跟瞄问题。

表1 链路预算

Table1 Link budget analysis

parameter	5 km transmission	10 km transmission
f/GHz	108	108
transmission distance/km	5	10
free space loss/dB	147.1	153.1
atmospheric loss reserve margin/dB	7.1	14.1
total loss/dB	154.2	167.2
output power/dBm	41	41
transmitting antenna gain/dBi	54	54
receiving antenna gain/dBi	54	54
power back-off/dB	4	4
other loss/dB	1	1
receiver threshold/dBm	-69	-69
receiver power/dBm	-10.2	-23.2
link margin/dB	58.8	45.8

表2 传播可靠度计算

Table2 Propagation reliability calculation

distance	5 km	10 km
propagation reliability	100%	99.32%

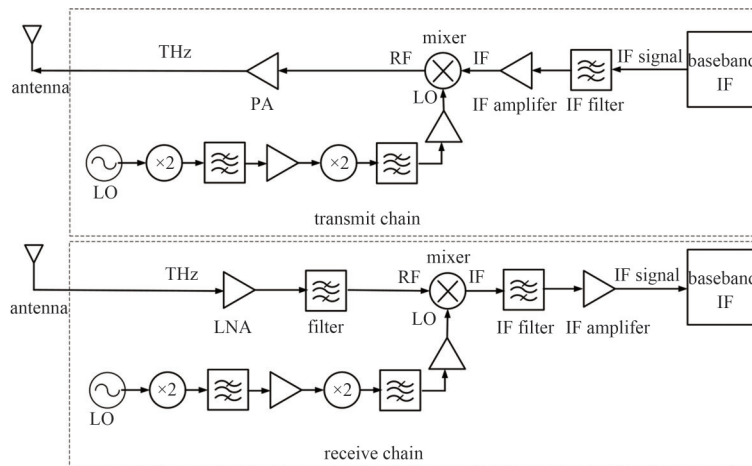


Fig.2 Architecture of THz transmission system

图2 THz传输系统结构

3 太赫兹无线通信试验

基于上述链路分析和系统设计，研发用于海上数据传输的太赫兹通信系统。为验证系统设计可行性，利用水面进行原理性试验。如图3所示，试验选择在10月石家庄某河边进行，河宽150 m，水汽衰减约为1.4 dB/km，收发设备分别架设在水面两边。首先验证天线对准跟踪的能力；天线对准后，验证太赫兹海上通信能力。一侧基带发送高速数字流，通过射频、天线分系统发射，另一侧进行接收，经调制解调后在本地连接一台计算机进行误码率分析等操作。经过实际验证，该太赫兹通信系统在误码率满足 2×10^{-8} 的情况下速率可达到520 Mbps，通过采用更大口径的天线，可满足5~10 km距离和Gbps量级数据传输需求。

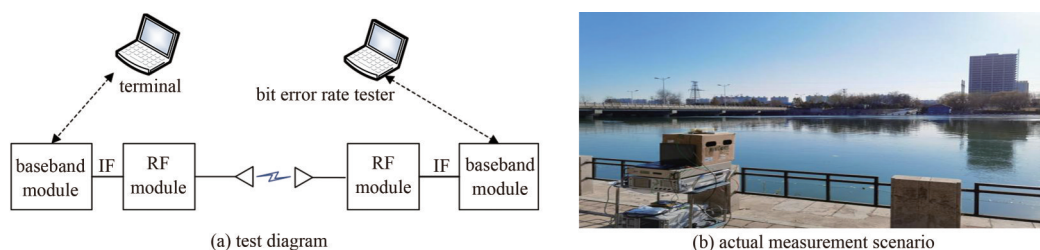


Fig.3 Test diagram and actual measurement scenario

图3 测试示意图和实测场景

4 结论

本文针对未来海上大容量、抗干扰、安全可靠通信需求,设计了一套海上太赫兹通信系统并进行实际验证。经验证,太赫兹频段可满足未来舰船间及海空间 Gbps 量级信息传输。为保证信号传输质量,可采用天线架高和分集、自适应均衡、高效纠错编译码等技术克服多径造成的影响。后续可探索采用太赫兹相控阵适配舰船间动态高速传输应用场景。

参考文献:

- [1] 董浩,宋亮,化存卿,等. 海上通信技术与研究综述[J]. 电信科学, 2022,38(5):17. (DONG Hao,SONG Liang,HUA Cunqing, et al. Survey of the research and development on the maritime communication technology[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(5):17.) doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2022087.
- [2] 张洪铭,同实,唐斌,等. 海上无线通信技术:现状与挑战[J]. 无线电通信技术, 2021,47(4):392-401. (ZHANG Hongming,YAN Shi,TANG Bin, et al. Maritime communications technologies: current progress and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2021,47(4):392-401.) doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2021.04.003.
- [3] 王力杰,李晖,程杰,等. 毫米波大规模 MIMO 与海上雨衰模型综述[J]. 电讯技术, 2020,60(7):856-864. (WANG Lijie,LI Hui, CHENG Jie, et al. An overview of millimeter wave massive MIMO technology and marine rain attenuation models[J]. Telecommunication Engineering, 2020,60(7):856-864.) doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2020.07.020.
- [4] 弋浩凡,官科,何丹萍,等. 太赫兹电波传播及信道特性[J]. 通信学报, 2022,43(1):34-48. (YI Haofan,GUAN Ke,HE Danping,et al. Terahertz wave propagation and channel characterization[J]. Journal on Communications, 2022,43(1):34-48.) doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2022013.
- [5] ITU-R. ITU-R P.836-6-2017 Water vapour:surface density and total columnar content[S]. 2017.
- [6] ITU-R. ITU-R P.676-7-2017 Attenuation by atmospheric gases[S]. 2017.
- [7] 工业和信息化部(通信). GB/T 14617.3-2012 陆地移动业务和固定业务传播特性 第3部分:视距微波接力通信系统传播特性[S]. 2012. (Ministry of Industry and Information Technology(Communications). GB/T 14617.3-2012 Propagation characteristics in land mobile service and fixed service-part 3:propagation characteristics of line-of-sight radio-relay communications[S]. 2012.)
- [8] 邓贤进. 亚太赫兹高速无线传输技术及试验研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (DNEG Xianjin. High speed wireless transmission technology and experimental research for sub-terahertz[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2021.)
- [9] 张永杰,孟庆凡,段文. 300 Mbps 长站距跨海微波系统设计[J]. 无线电通信技术, 2019,45(3):266-270. (ZHANG Yongjie, MENG Qingfan,DUAN Wen. Design of 300 Mbps long distance cross-sea microwave communication[J]. Radio Communications Technology, 2019,45(3):266-270.) doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2019.03.09.
- [10] 熊子康,何敬锁,武晓磊,等. 310 GHz 太赫兹通信系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(3):369-373. (XIONG Zikang,HE Jingsuo,WU Xiaolei,et al. Design of 310 GHz Terahertz communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(3):369-373.) doi:10.11805/TKYDA2018281.

作者简介:

刘 宁(1983-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为毫米波与太赫兹通信系统.email:liuning1512@163.com.

崔冠峰(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为毫米波及太赫兹天线。

宋瑞良(1980-),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向为太赫兹通信系统。

尚国涛(1992-),男,硕士,工程师,主要研究方向为毫米波及太赫兹射频前端。