

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.231209001

分集接收技术在海上空通信中继系统中的应用*

陈书恒, 张鑫, 朱倪瑶, 赵勇

(中国人民解放军 92728 部队, 上海 200436)

摘要:海上空通信中继系统是解决海上广域无线宽带通信的重要手段,但其性能易受海面波动带来的多径衰落影响。为了有效提升中继系统接收信号质量,提出了一种多天线分集接收方法,通过现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现相应的接收处理。仿真分析及实验室测试表明,所提出的四天线分集接收技术能够带来近 6 dB 的合成增益。经海上对比试验验证,采用所提出的多天线分集接收技术的升空通信中继系统,其数据接收完整性提升了 10%~20%,系统性能显著改善。

关键词:海上空平台;通信中继;多径衰落;分集接收

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN925.1 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)02-0247-05

Application of Diversity Reception Technology in a Maritime Airborne Communication Relay System

CHEN Shuheng, ZHANG Xin, ZHU Niyao, ZHAO Yong

(Unit 92728 of PLA, Shanghai 200436, China)

Abstract: The maritime airborne communication relay system is an important means to solve the problem of wide area wireless broadband communication at sea, but its performance is easily affected by multipath fading caused by sea surface fluctuations. To effectively improve the signal quality of the airborne communication relay system, a multi-antenna diversity reception method is proposed in which corresponding reception processing is realized through field programmable gate array (FPGA). Simulation analysis and laboratory test show that the proposed four-antenna diversity reception technology can bring a synthetic gain of nearly 6 dB. Through sea comparative experiments, it is verified that the data reception integrity of the airborne communication relay system adopting the proposed multi-antenna diversity reception technology is improved by 10% to 20%, and the system performance is significantly improved.

Key words: maritime airborne platform; communications relay; multipath fading; diversity reception

0 引言

海上空通信中继系统主要包括能较长时间停留在一定空域范围的直升机、长航时无人机、浮空气

球等平台,以及其搭载的通信中继转发设备。系统升空运行后能够使海上舰船之间、舰船与低空飞行器之间或舰船与地面站之间实现宽带超视距通信,

* 收稿日期:2023-12-09;修回日期:2024-01-20
通信作者:陈书恒 Email:chenshuheng1984@sina.cn

有效地实现海上大范围超视距平台间的无线宽带通信^[1-2]。然而,海面波动带来的多径衰落会对无线宽带通信质量造成严重影响^[3-5],从而恶化升空通信中继系统的中继效能,甚至导致系统不可用。分集接收技术是一种有效的抗衰落技术途径^[4,6],特别是对于宽带通信信号,利用多个天线的空间分集技术可有效减小接收机端的信号衰落深度,提高接收端信噪比^[8-10]。

本文利用分集接收技术设计实现了一种抗多径衰落的海上升空通信中继系统。该系统通过安装架的方式在直升机平台底部布设了多个天线组成的天线阵列,通过数字信号处理的方法实现各接收信号的有效合成,增强有用信号,抑制噪声干扰。仿真和试验验证表明,该方法能够有效提升海上升空通信中继系统的接收信号质量,扩展系统中继覆盖范围。

1 分集接收原理与实现

海上升空通信中继系统的主要工作方式和构成如图 1 所示。

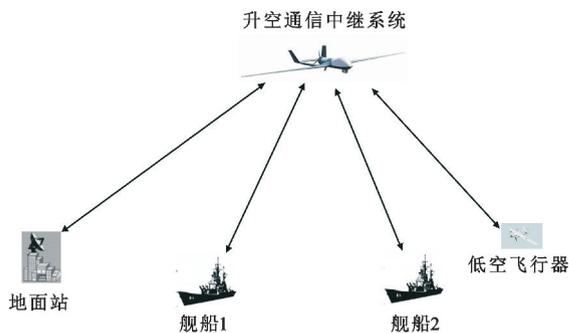


图 1 海上升空通信中继系统

Fig. 1 Illustration of a maritime airborne communication relay system

为增强升空通信中继系统信号的强度,保证中继数据的完整性,可采用多天线分集接收技术提升系统信号接收能力,其原理如图 2 所示。中继系统通过多天线接收中继对象发射的信号,每副接收天线对应一个接收通道,信号在接收通道中采样后进行数字信号处理,实现对多个天线接收信号传输信道参数的提取,并根据信道参数对不同通道接收信号加权合成,实现信号叠加和噪声相消,从而提高信号信噪比。在系统的实际应用过程中,还采用了频率分集技术解决了多天线之间的信号互扰问题。

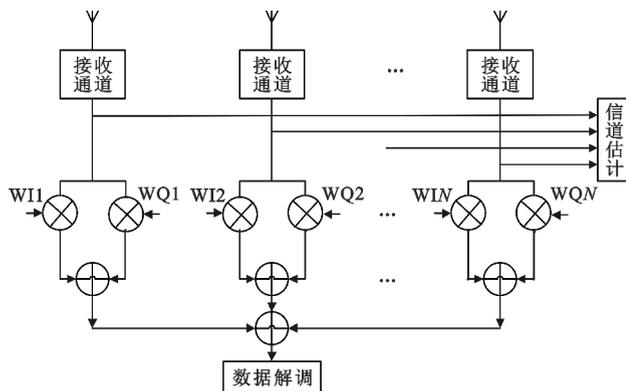


图 2 分集接收技术原理框图

Fig. 2 Block diagram of diversity reception technology principle

当两个分集天线同时接收相同发射信号 s 时,两路信号 $x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 可以表示为式(1),其信号时延相差 Δk ,幅度分别为 α_1 和 α_2 ,相位相差 ϕ ,噪声分别为 $n_1(k)$ 和 $n_2(k+\Delta k)$ 。若考虑两个接收天线与信号发射源之间的相对位置关系一致,则不存在多普勒效应引起的频偏差异。

$$\begin{cases} x_1(k) = \alpha_1 s(k) e^{j\omega k} + n_1(k) \\ x_2(k) = \alpha_2 s(k+\Delta k) e^{j(\omega k + \omega \Delta k + \phi)} + n_2(k+\Delta k) \end{cases} \quad (1)$$

当两个接收天线间距引入的信号延时远小于数据周期且采样率足够高时,可以近似得到

$$s(k+\Delta k) \cong s(k) \quad (2)$$

分别对两路信号分别按权值 w_1 和 w_2 进行加权合成,合成后信号 $x_c(k)$ 可表示为

$$x_c(k) = (w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2 e^{j(\omega \Delta k + \phi)}) s(k) e^{j\omega k} + (w_1 n_1 + w_2 n_2) \quad (3)$$

根据最大合成信号信噪比准则^[6],各天线的权值在相位上使得各信号相位对齐,在幅度上正比于各加权信号幅度和噪声方差的比值时,合成信号信噪比最大,此时有

$$\text{Angle}(w_1) = \text{Angle}(w_2) + \omega \Delta k + \phi \quad (4)$$

$$\|w_i\| = \frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} = \frac{\rho_i}{\alpha_i}, i = 1 \text{ or } 2 \quad (5)$$

式中: σ_i^2 为天线接收信号的噪声方差; ρ_i 为接收信号信噪比。

故合成信号最大信噪比 ρ_{opt} 可表示为式(6),相应合成增益 $\Delta\rho$ 可表示为式(7)。

$$\rho_{\text{opt}} = \frac{\alpha_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{\alpha_2^2}{\sigma_2^2} = \rho_1 + \rho_2 \quad (6)$$

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{opt}}}{\rho_1} = 1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 + \Delta\rho_{21} \quad (7)$$

上述结论易推广到多个天线系统,即对于 L 个

天线阵元合成, 合成后可以获得最大合成增益 $\Delta\rho_L$ 为

$$\Delta\rho_L = 1 + \sum_{i=2}^L \Delta\rho_{i1} \quad (8)$$

利用现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 对所设计的分集接收技术进行实现, 首先给出两天线分集接收时相应的模块组成, 如图 3 所示。

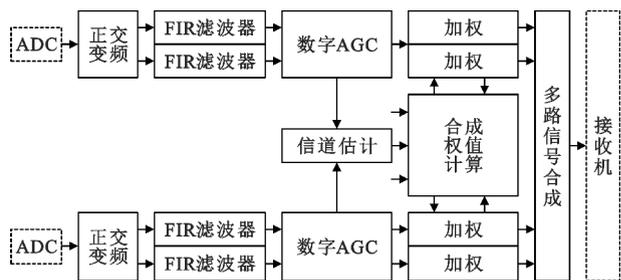


图 3 FPGA 实现分集接收模块组成

Fig. 3 Composition of diversity receiving module based on FPGA

每路信号经模数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 转换为数字信号并送入 FPGA 后, 在 FPGA 内部进行正交下变频到零中频正交信号, 再分别进入数字有限脉冲响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器滤波处理后进入数字自动增益控制 (Automatic Gain Control, AGC) 稳幅。稳幅后的信号用于对信道进行估计, 然后利用估计参数计算各路信号的分集合成权值, 并对信号进行加权合成后送入接收机进行信号解调。多于两天线的分集接收均可在该模块组成基础上扩展得到。

综合考虑实现成本和天线安装等因素, 本文所设计的升空通信中继系统使用的分集接收天线数量设置为 4 个。

2 仿真分析

在 Matlab 中使用数值仿真方法对所提出的分集接收技术进行验证。由于所设计分集接收信号处理的基本单元为两天线分集, 首先对两天线分集接收效果进行仿真评估。向两天线分集接收处理仿真模块注入信噪比 $-20 \sim 10$ dB 范围内变化信号, 信号信噪比差异在 $-10 \sim 0$ dB 变化。分集接收处理后的合成信号增益与两注入信号差异信噪比关系如图 4 所示, 在两信号差异为 0 时达到最佳合成效果, 两天线分集增益可达到约 3 dB。随着天线输入信号差

异增大, 合成增益会下降, 但增益仍然大于 0 dB。

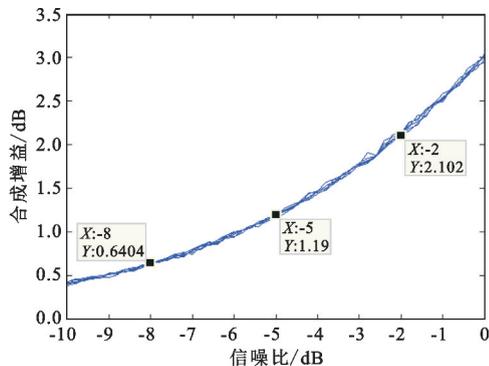


图 4 分集合成增益与差异信噪比关系

Fig. 4 Relationship between diversity synthesis gain and differential signal-to-noise ratio

进一步给出两信号输入信噪比在 $-5 \sim 10$ dB 范围变化时, 两天线分集合成信号与两信号分别输入后输出信号的信噪比, 如图 5 所示。可见, 两路信号信噪比差异不大时, 分集合成增益接近 3 dB。四天线分集合成是在两天线基础上进一步叠加而成, 通过以上对两天线的仿真可知, 四天线合成增益理论能够接近 6 dB。

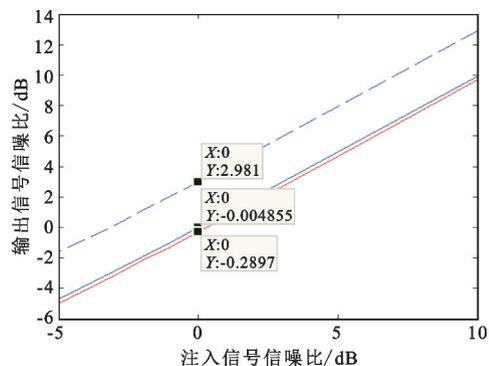


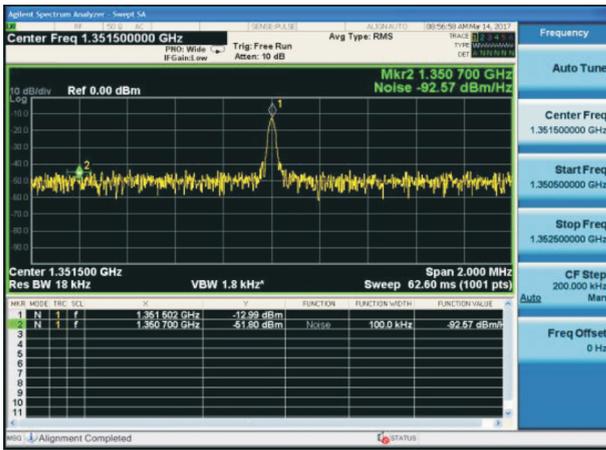
图 5 分集合成信号与单个信号输出信噪比

Fig. 5 Diversity synthesis signal and single signal output signal-to-noise ratio

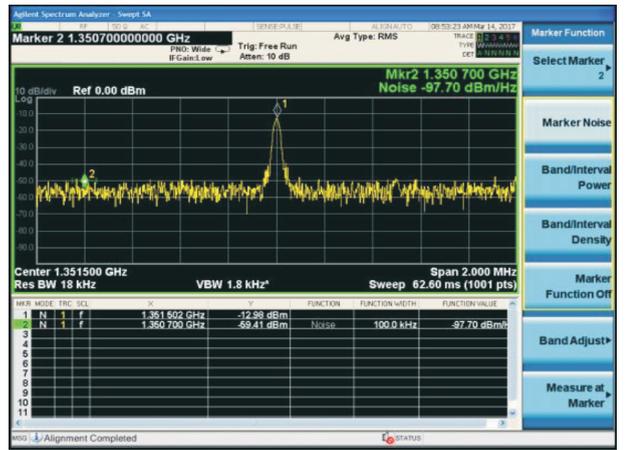
3 试验验证

3.1 实验室有线测试

对所设计的升空通信中继系统的分集接收效果进行有线测试。首先从 4 个天线端口输入单载波信号, 未经分集接收合成的单路信号与 4 通道合成后的信号如图 6 所示。其中, 单路载波接收信号经直接转发后信噪比为 $C/N = 79.58$ dB, 4 路分集接收合成信号经转发后信噪比达到 $C/N = 84.72$ dB, 合成增益 5.14 dB。



(a) 未分集接收

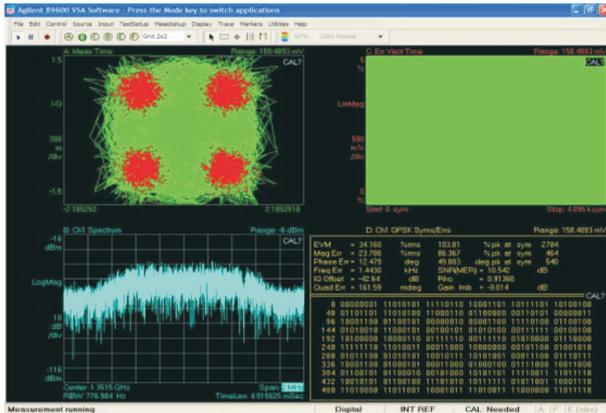


(b) 四通道分集接收

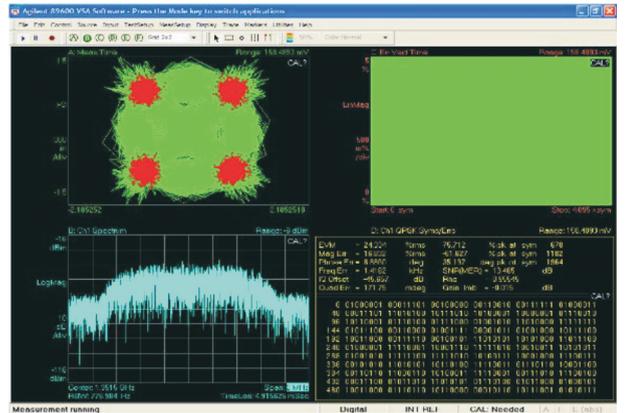
图 6 单载波有线测试
Fig. 6 Single carrier wired test

进一步将正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制信号输入 4 个天线端口,如图 7 所示,可看到分集接收合成信号的信号质量明显优

于单路接收信号,信号星座图更清晰,相位误差等指标也得到了明显改善。



(a) 未分集接收



(b) 四通道分集接收

图 7 QPSK 信号有线测试
Fig. 7 QPSK signal wired test

3.2 海上实测试验

将应用了四天线分集接收技术的升空通信中继系统加装到直升机上,天线分布于机身两侧,左右各两个接收天线,加装完成后进行海上通信中继试验。同时,为对比应用所设计四天线分集接收技术的通信中继系统与未使用分集接收技术通信中继系统的性能差异,在试验海域布置了 1 号中继站(编号 116,分集)、2 号中继站(编号 111,未分集)、3 号中继站(编号 115,分集)和 4 号中继站(编号 112,未分集)。

如图 8 所示,在海上试验过程中,选择 14 号目标发送的位置数据作为各中继站的接收数据,基带数据发送速率为 2 Mb/s,对各中继站接收数据的完

整性进行统计分析,结果如表 1 所示。可见,应用四天线分集接收技术的升空通信中继系统在数据接收完整性上有明显提高,相对未使用该技术的通信中继系统,数据完整性提升了 10%~20%。相关差异也表现在图 8 所示的 14 号目标直线轨迹连续性中。

表 1 各中继站接收数据完整性
Tab. 1 The integrity of data received by each relay station

中继站编号	应收帧数	正确帧数	数据完整性/%	备注
111	361 986	321 833	88.9	
112	361 986	275 813	75.2	
115	361 986	353 968	97.8	四天线分集接收
116	361 986	352 706	97.4	四天线分集接收

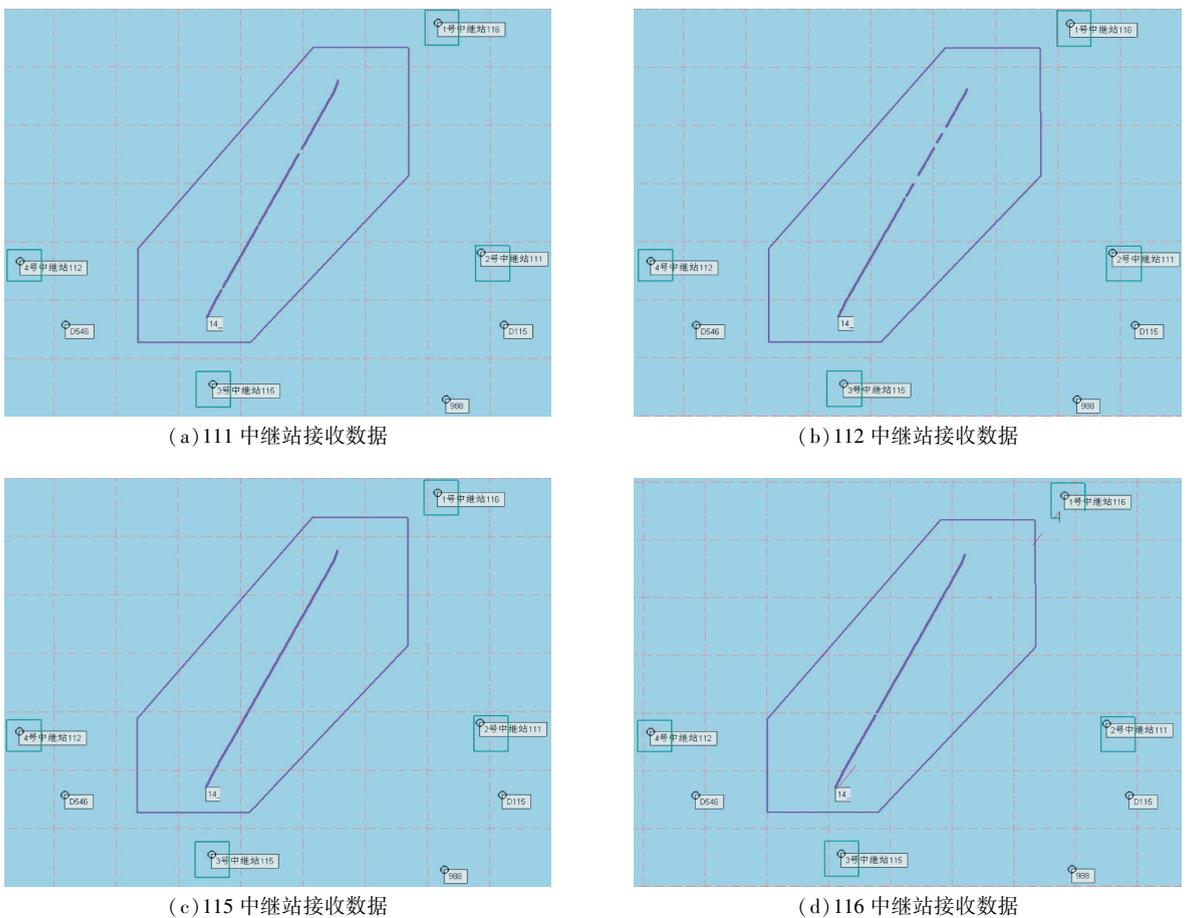


图 8 海上对比试验结果

Fig. 8 Comparative marine test results

4 结论

本文针对海上升空通信中继系统存在的接收信号多径衰落问题,提出了采用四天线分集接收技术提升接收信号质量的方法,并给出了相应的 FPGA 实现方案。通过仿真分析给出了所提出的分集接收技术的预期性能,进一步在实验室有线测试和海上实测试验中验证了其有效性。

参考文献:

- [1] 陈灿彬. 海上宽带移动无线信道建模研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [2] 杨卫国, 王林, 冯诚, 等. 双向多中继通信系统中继选择方案[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(1): 157-160.
- [3] MALIATSOS K, CONSTANTINOU P, DALLAS P, et al. Measuring and modeling the wideband mobile channel for above the sea propagation paths[C]//Proceedings of 2006 European Conference on Antennas and Propagation. Nice: IEEE, 2006: 1-6.
- [4] 张会清, 王普, 高学金, 等. 分集接收抗多径衰落性能及在隧道模型中仿真[J]. 电波科学学报, 2010, 25(4): 793-797.
- [5] 孙林, 毛忠阳, 康家方, 等. 基于最大化能效的海上

- 中继通信频谱分配算法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(8): 2661-2667.
- [6] 孔令全. 综合化机载塔康测距的双天线分集接收设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(8): 1-6.
- [7] 田洪伟, 安静宇, 宋幻. 基于最大化能效的海上中继通信频谱分配算法技术的研究与实现[J]. 现代电子技术, 2022, 45(23): 41-44.
- [8] 苏天禹, 汤旭东, 宋大勇. 基于分集接收技术的岸海短波通信系统研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(2): 57-60.
- [9] 程文帝. 短波多载波调制信号的分集接收处理技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [10] 许林. 基于 STBC 和 MRC 的多天线分集算法及其性能分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(12): 1900-1904.

作者简介:

陈书恒 男, 1984 年生于湖南岳阳, 2011 年获硕士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为航空电子系统技术。

张鑫 男, 1984 年生于湖北武汉, 2015 年获博士学位, 现为工程师, 主要研究方向为通信导航技术。

朱倪瑶 女, 1991 年生于重庆, 2015 年获硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为目标识别。

赵勇 男, 1986 年生于湖南常德, 2016 年获博士学位, 现为工程师, 主要研究方向为数据分析。