

面向智慧农业的大田图像无线传输系统设计与MATLAB仿真

杨 淼, 蔡昌友*

辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月11日

摘 要

随着智慧农业、农业物联网以及无线通信技术的快速发展, 大田图像实时采集与远距离可靠传输已成为农业智能监测系统的重要基础。针对复杂农业无线传播环境下图像传输可靠性和通信性能不足的问题, 设计了一种面向智慧农业的大田图像无线传输系统, 并基于MATLAB建立完整通信链路模型。系统以真实大田作物图像为输入, 依次完成JPEG图像压缩、16QAM数字调制、OFDM基带传输、无线衰落信道传播、接收端同步解调及图像重构, 分别构建AWGN、Rayleigh和Rician三种典型无线信道, 对系统通信性能进行仿真分析。实验从JPEG压缩性能、16QAM星座特性、OFDM时域波形、功率谱密度、多帧频谱稳定性、时频能量分布、误码率、图像重构质量以及系统有效吞吐率和传输时延等方面进行了综合评价。仿真结果表明, JPEG质量因子取75时能够兼顾图像恢复质量与数据压缩效率; 随着信噪比提高, 系统误码率显著下降, 星座点逐渐收敛, 图像重构质量持续改善, 其中AWGN信道具有最佳传输性能, Rician信道优于Rayleigh信道; 同时, OFDM信号具有良好的频谱利用率和时频稳定性, 在保证较高图像恢复质量的同时能够获得较高有效吞吐率和较低传输时延。研究结果验证了所设计系统在智慧农业图像无线传输中的可行性与有效性, 可为农业无线图像通信系统设计及性能优化提供参考。

关键词

智慧农业, 无线图像传输, OFDM, 16QAM, MATLAB仿真, Rayleigh信道, 图像重构

Design and MATLAB Simulation of Field Image Wireless Transmission System for Smart Agriculture

Miao Yang, Changyou Cai*

School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

*通讯作者。

文章引用: 杨淼, 蔡昌友. 面向智慧农业的大田图像无线传输系统设计与 MATLAB 仿真[J]. 仪器与设备, 2026, 14(3): 383-404. DOI: 10.12677/iae.2026.143043

Abstract

With the rapid development of intelligent agriculture, agricultural Internet of Things and wireless communication technology, real-time acquisition and long-distance reliable transmission of field images have become an important foundation of agricultural intelligent monitoring system. Aiming at the problem of insufficient reliability and communication performance of image transmission in complex agricultural wireless communication environment, a wireless transmission system of field image for smart agriculture is designed, and a complete communication link model is established based on MATLAB. The system takes real field crop images as input, and completes JPEG image compression, 16QAM digital modulation, OFDM baseband transmission, wireless fading channel propagation, synchronous demodulation and image reconstruction in turn. Three typical wireless channels, AWGN, Rayleigh and Rician, are constructed respectively, and the communication performance of the system is simulated and analyzed. The experiment comprehensively evaluates JPEG compression performance, 16QAM constellation characteristics, OFDM time domain waveform, power spectral density, multi-frame spectrum stability, time-frequency energy distribution, bit error rate, image reconstruction quality, effective system throughput and transmission delay. The simulation results show that the JPEG quality factor of 75 can give consideration to both image restoration quality and data compression efficiency. With the improvement of signal-to-noise ratio, the bit error rate of the system decreases significantly, the constellation points gradually converge, and the quality of image reconstruction continues to improve. AWGN channel has the best transmission performance, and Rician channel is better than Rayleigh channel. At the same time, OFDM signals have good spectrum utilization and time-frequency stability, and can obtain high effective throughput and low transmission delay while ensuring high image restoration quality. The research results verify the feasibility and effectiveness of the designed system in the wireless transmission of intelligent agricultural images, which can provide reference for the design and performance optimization of agricultural wireless image communication system.

Keywords

Smart Agriculture, Wireless Image Transmission, OFDM, 16QAM, MATLAB Simulation, Rayleigh Channel, Image Reconstruction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着数字农业、智慧农业以及农业物联网技术的不断发展,以无人机、农业机器人、无线图像采集终端和智能传感节点为代表的新型农业信息[1]获取设备逐渐成为现代农业生产的重要组成部分。大田作物长势监测、病虫害巡检、农田环境感知及精准施肥等农业应用均需要实时获取大量高分辨率图像信息,并通过无线通信网络传输至边缘服务器或监测平台完成后续分析。因此,建立稳定、高效、可靠的大田图像无线传输系统已成为智慧农业通信网络[2]建设的重要研究内容。

传统农业图像传输主要依赖有线网络或短距离无线通信方式,不仅设备部署成本较高,而且难以满足大面积农田环境下远距离、多节点及移动终端的数据传输需求。与此同时,大田环境具有植被遮挡、

多径传播、复杂地形及电磁干扰等特点, 无线信号在传播过程中容易受到阴影衰落、多径衰落及噪声干扰等因素影响, 导致图像数据出现误码增加、图像失真、传输时延增大等问题, 从而影响农业信息采集系统的稳定运行。因此, 如何建立适用于智慧农业场景的无线图像传输模型, 并对系统通信性能进行定量分析, 成为当前农业无线通信领域的重要研究方向。

近年来, OFDM 技术[3]因具有较高的频谱利用率、良好的抗多径干扰能力以及较低的均衡复杂度, 被广泛应用于第四代、第五代移动通信系统[4]及无线局域网等现代通信系统。与此同时, QAM 调制[5]能够在有限带宽条件下有效提高频谱传输效率, 结合图像压缩编码技术, 可显著降低农业图像无线传输所需的数据量, 提高系统整体传输效率。随着 MATLAB 通信系统工具箱的发展, 利用 MATLAB 建立完整无线图像通信模型已成为通信系统设计、性能分析及工程验证的重要研究手段, 其具有建模方便、参数可控及实验重复性高等优点, 能够真实反映不同无线信道环境下系统性能变化规律。

尽管现有研究已经在农业物联网、无人机通信以及无线多媒体传输等方面取得了一定成果, 但针对大田环境下图像无线传输仍存在以下不足。首先, 现有农业物联网研究主要关注传感数据采集与低速率信息传输, 对于大尺寸农业图像数据在无线链路中的压缩、调制以及传输过程研究不足, 难以满足无人机巡检和远距离图像监测等高数据量业务需求。其次, 现有无人机农业通信研究通常针对链路覆盖范围、网络拓扑以及传输效率进行优化, 而对于复杂农业环境中的无线衰落、多径传播以及同步误差等因素对图像传输质量的影响考虑不足, 导致实际应用中的可靠性仍需进一步验证。现有无线多媒体传输研究更多集中于视频和通用图像通信场景, 对于农业图像具有纹理复杂、数据量大以及恢复质量要求高等特点的传输需求研究相对不足, 缺少针对通信性能与图像恢复质量联合评价的完整分析。

针对上述问题, 本文设计了一种基于 MATLAB 的大田图像无线传输系统, 建立了由农业图像采集[6]、JPEG 图像压缩[7]、QAM 数字调制[8]、OFDM 基带传输[9]、无线衰落信道[10]、接收端同步解调及图像重构组成的完整通信链路模型。针对实际农业无线环境, 分别构建 AWGN、Rayleigh 和 Rician 信道模型, 并进一步考虑载波频率偏移影响, 引入频偏估计与补偿机制, 提高系统模型的工程适用性。同时, 通过 BER、PSNR、SSIM、吞吐率以及传输时延等指标, 对通信可靠性、图像恢复质量以及系统传输效率进行综合评价, 为智慧农业场景下无线图像传输系统设计提供参考。

2. 大田图像无线传输系统总体设计

2.1. 系统设计目标

智慧农业环境下, 大田图像通常来源于固定监测终端、无人机巡检平台以及移动采集终端, 其采集区域广、图像数据量大、传输距离远, 对无线通信系统的可靠性、实时性及图像恢复质量提出了较高要求。由于农田环境存在植被遮挡、多径传播、复杂地形及随机噪声等因素, 无线图像在传输过程中容易出现误码率增加、图像失真及传输时延增大的问题。因此, 本系统以智慧农业图像远距离无线传输为研究对象, 构建完整的大田图像数字通信系统, 并利用 MATLAB 建立通信链路模型, 对系统整体性能进行分析与验证。

系统设计主要满足以下目标:

- (1) 建立完整的大田图像无线通信链路, 实现农业图像从发送端到接收端的数字化无线传输。
- (2) 采用 JPEG 图像压缩技术降低图像数据冗余, 提高无线信道传输效率。
- (3) 采用 QAM 数字调制与 OFDM 多载波传输技术, 提高系统频谱利用率及抗多径干扰能力。
- (4) 建立 AWGN、Rayleigh 及 Rician 三种典型无线信道模型, 模拟智慧农业复杂无线传播环境。
- (5) 采用 MATLAB 建立系统仿真平台, 对误码率、图像恢复质量及通信性能进行综合分析, 为智慧

农业无线图像通信系统设计提供理论依据。

整个系统采用模块化设计思想, 各功能模块相互独立、接口统一, 既能够实现完整通信链路建模, 又便于后续参数优化及系统扩展。

2.2. 系统总体架构

根据智慧农业图像无线通信过程, 本文设计的大田图像无线传输系统主要由图像采集模块、发送端处理模块、无线信道模块以及接收端恢复模块四部分组成。

整个通信系统遵循数字通信系统基本模型。首先, 发送端完成农业图像采集, 并利用 JPEG 压缩算法减少图像数据量; 随后, 将图像数据转换为二进制比特流, 并采用 QAM 调制完成数字调制处理。为了提高无线传输抗多径性能, 系统进一步采用 OFDM 技术完成基带调制, 并通过无线信道发送至接收端。

无线信道模块用于模拟农业环境中复杂传播条件, 分别建立 AWGN 信道、Rayleigh 衰落信道以及 Rician 衰落信道。其中, AWGN 信道主要反映随机热噪声影响; Rayleigh 信道用于模拟非视距传播环境; Rician 信道则适用于存在直射路径的农业无线通信场景。通过不同信道模型, 可以全面分析系统在复杂无线环境下的通信性能。

接收端首先完成 OFDM 解调与 QAM 解调, 然后恢复原始图像数据, 并利用 JPEG 解码获得重构图像。最后, 通过误码率、峰值信噪比、结构相似性及系统吞吐率等指标, 对无线图像传输性能进行综合评价。

2.3. 系统组成

为了便于系统设计与性能分析, 整个通信系统划分为发送端、无线信道以及接收端三个核心模块。

(1) 发送端模块

发送端主要完成农业图像数字化处理, 其主要组成包括图像采集、JPEG 压缩、比特流生成、QAM 调制及 OFDM 调制五个部分。农业图像首先由图像采集设备获取, 并统一转换为 RGB 数字图像。随后, 采用 JPEG 压缩算法对图像进行编码, 减少图像数据冗余, 提高后续无线传输效率。压缩后的图像数据经过串并转换形成二进制数据流, 并采用 QAM 数字调制完成符号映射。最后, 利用 OFDM 技术完成 IFFT 变换、循环前缀插入及并串转换, 形成适用于无线信道传输的基带信号。

(2) 无线信道模块

无线信道用于模拟农业环境中复杂电磁传播过程, 是影响图像恢复质量的重要组成部分。本文建立三种典型无线传播模型。① 加性高斯白噪声(AWGN)信道; ② Rayleigh 多径衰落信道; ③ Rician 衰落信道。

其中, AWGN 信道主要用于模拟电子设备热噪声; Rayleigh 信道主要反映植被遮挡、多径反射等非视距传播环境; Rician 信道则适用于无人机与地面终端之间存在直射路径的无线通信场景。通过调整不同信噪比条件, 可分析系统在不同无线环境下的传输性能。

(3) 接收端模块

接收端主要完成图像恢复与通信性能评价。首先, 对接收信号完成循环前缀去除、FFT 变换及 QAM 解调, 恢复发送端原始比特流; 随后, 根据 JPEG 解码算法重建农业图像。最后, 分别计算误码率(BER)、峰值信噪比(PSNR)、结构相似性(SSIM)及系统吞吐率等指标, 对无线图像传输质量进行评价。

为了保证实验结果的可重复性, 本文所有通信模型均采用 MATLAB R2022b 建立统一仿真平台, 系统参数保持一致, 仅改变无线信道及信噪比条件, 以保证不同实验之间具有可比性。

3. 大田图像无线传输关键技术

3.1. 数字图像传输模型

智慧农业无线图像传输系统属于典型的数字通信系统,其主要功能是将采集到的大田图像转换为数字比特流,通过无线通信链路传输至接收端,并完成图像重构与质量恢复。整个系统的数据处理过程包括图像采集、图像压缩、数字调制、多载波传输、无线信道传播、数字解调及图像恢复等多个环节。

设采集得到的大田彩色图像表示为:

$$I(x, y) \in \mathbb{R}^{M \times N \times 3} \quad (1)$$

其中 M 表示图像高度, N 表示图像宽度, RGB 三个颜色通道共同组成原始彩色图像。

为了降低无线传输过程中所需的数据量,首先采用 JPEG 图像压缩算法对原始图像进行编码处理,将二维图像转换为压缩码流:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_L\} \quad (2)$$

其中 L 表示压缩后的总比特数, $b_i \in (0, 1)$ 。

随后,比特流经过数字调制映射形成复数调制符号

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\} \quad (3)$$

其中 $s_k \in \mathbb{C}$ 表示第 k 个发送符号。

发送符号经过 OFDM 调制形成时域发送信号:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (4)$$

其中 N 为 OFDM 子载波数, s_k 表示第 k 个子载波的数据符号, $x(n)$ 表示 IFFT 后的时域发送信号。

发送信号通过农业无线信道后到达接收端,经 FFT 恢复频域信号,再完成 QAM 解调与 JPEG 解码,最终恢复农业图像。整个无线图像通信过程可表示为:

$$I(x, y) \rightarrow B \rightarrow S \rightarrow x(n) \rightarrow h(n) \rightarrow r(n) \rightarrow \hat{S} \rightarrow \hat{B} \rightarrow \hat{I}(x, y) \quad (5)$$

其中 $h(n)$ 表示无线信道; $r(n)$ 表示接收信号; $\hat{I}(x, y)$ 表示恢复后的图像。

3.2. JPEG 图像压缩技术

农业图像通常具有较高的空间分辨率,一幅彩色图像的数据量通常达到数 MB 以上。若直接进行无线传输,将占用大量无线带宽,并降低系统传输效率。因此,在发送端首先采用 JPEG 图像压缩技术减少图像冗余,提高系统通信效率。

JPEG 压缩主要包括颜色空间转换、离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)、量化编码及熵编码四个过程。首先,将 RGB 图像转换为 YCbCr 颜色空间,其转换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 Y 表示亮度分量; Cb 、 Cr 表示色度分量。

随后,将图像划分为 8×8 图像块,对每一个图像块分别进行二维离散余弦变换。设图像块表示为 $f(x, y)$ 。则二维 DCT 表示为:

$$F(u, v) = \frac{2}{N} C(u) C(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (7)$$

$$\text{其中 } C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, u=0 \\ 1, u \neq 0 \end{cases}。$$

二维 DCT 能够将大部分图像能量集中于低频区域, 为后续量化提供基础。完成 DCT 之后, 根据量化矩阵进行量化处理:

$$Q(u, v) = \text{round} \left(\frac{F(u, v)}{T(u, v)} \right) \quad (8)$$

其中 $T(u, v)$ 表示 JPEG 标准量化矩阵; round 表示四舍五入运算。经过量化后, 大量高频系数变为零, 显著减少了图像编码长度。

最后, 对量化结果进行 Zig-Zag 扫描、游程编码以及 Huffman 编码, 形成最终 JPEG 压缩码流。JPEG 压缩后的数据量通常仅为原始图像的 10%~30%, 能够显著提高无线传输效率, 同时保持较好的图像视觉质量, 因此被广泛应用于无线图像通信系统。

3.3. QAM 数字调制技术

为了提高无线通信系统的频谱利用率, 本文采用正交幅度调制[11] (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 作为数字调制方式。QAM 通过同时调制同相分量和正交分量, 在有限带宽内传输更多的信息符号, 其复包络可表示为:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (9)$$

其中 $I(t)$ 表示同相分量; $Q(t)$ 表示正交分量; f_c 表示载波频率。设发送符号表示为:

$$a_k = I_k + jQ_k \quad (10)$$

则 QAM 星座可表示为:

$$S = \{a_1, a_2, \dots, a_M\} \quad (11)$$

其中 M 表示调制阶数。

本文采用 16QAM 作为主要调制方式, 每个符号携带 4 bit 信息, 因此符号速率能够有效提高, 同时保持较好的误码性能。完成 QAM 调制后, 所有复数符号按照 OFDM 子载波进行映射, 为后续多载波调制提供输入。

3.4. OFDM 无线传输模型

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种典型的多载波数字传输技术, 能够将高速数据流划分为多个低速并行数据流, 通过多个相互正交的子载波同时进行传输, 从而有效降低符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI), 提高系统抗多径衰落能力。因此, 本文采用 OFDM 作为无线图像传输系统的核心传输技术。在发送端, 经过 QAM 调制后的复数符号按照子载波顺序排列形成频域符号向量:

$$S = \{S_0, S_1, \dots, S_{N-1}\}^T \quad (12)$$

其中 N 表示 OFDM 子载波数量; S_k 表示第 k 个子载波上的调制符号。

为了将频域信号转换为时域发送信号, 需要进行逆快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), 其表达式为:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j \frac{2\pi kn}{N}}, n=0,1,\dots,N-1 \quad (13)$$

其中 $x(n)$ 为 OFDM 发送信号; $j = \sqrt{-1}$, $\frac{1}{\sqrt{N}}$ 用于保持系统能量归一化。

完成 IFFT 后, 为避免多径传播造成的符号间干扰, 需要在每个 OFDM 符号前添加循环前缀(Cyclic Prefix, CP)。设循环前缀长度为 N_{cp} , 则发送信号变为:

$$x_{cp}(n) = [x(N - N_{cp}), \dots, x(N-1)x(0) \cdots x(N-1)] \quad (14)$$

循环前缀能够保证无线信道卷积变为循环卷积, 使接收端能够采用 FFT 实现简单均衡, 从而有效抑制多径干扰。无线信号经过传播后, 接收端首先去除循环前缀, 然后进行 FFT 变换恢复频域数据, 其数学表达式为:

$$R(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} r(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (15)$$

其中 $r(n)$ 表示接收时域信号; $R(k)$ 表示恢复后的频域信号。

经过 FFT 之后即可完成 QAM 解调, 并进一步恢复原始图像数据。由于 OFDM 具有较高的频谱利用率及良好的抗多径性能, 因此已广泛应用于 LTE、5G NR、WiFi 6 及数字电视等现代无线通信系统, 同样适用于智慧农业无线图像传输场景。

3.5. AWGN 信道模型

无线通信过程中不可避免地受到电子器件热噪声及环境随机噪声的影响, 因此本文首先建立加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道模型。AWGN 信道[12]认为噪声满足独立同分布高斯随机过程, 其概率密度函数表示为:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

其中 σ^2 表示噪声功率; n 表示高斯随机噪声。发送信号经过 AWGN 信道后, 接收信号表示为:

$$r(n) = x(n) + n(n) \quad (17)$$

其中 $x(n)$ 表示发送信号; $n(n)$ 表示高斯白噪声; $r(n)$ 表示接收信号。

本文采用信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)控制噪声大小, 其定义为:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (18)$$

其中 P_s 表示信号平均功率; P_n 表示噪声平均功率。

在 MATLAB 仿真过程中, 将 SNR 设置为 0~30 dB, 通过改变噪声功率分析无线图像传输性能变化规律。

3.6. Rayleigh 衰落信道模型

农业无线通信环境通常存在大量植被、建筑物及地形遮挡, 电磁波主要依赖散射、绕射及反射传播,

因此接收端往往不存在稳定的直射路径。在这种情况下, 无线信号幅度服从 Rayleigh 分布, 因此采用 Rayleigh 衰落模型描述非视距传播环境。设无线信道冲激响应表示为:

$$h(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_i e^{j\phi_i \delta(t-\tau_i)} \quad (19)$$

其中 L 是多径数量; α_i 表示第 i 条路径幅值; ϕ_i 表示随机相位; τ_i 表示传播时延。

信号经过 Rayleigh 信道后的接收模型表示为:

$$r(t) = h(t)x(t) + n(t) \quad (20)$$

其中 $h(t)$ 表示 Rayleigh 衰落系数; $x(t)$ 表示发送信号; $n(t)$ 表示 AWGN 噪声。

Rayleigh 衰落包络概率密度函数表示为:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), r \geq 0 \quad (21)$$

该模型能够较真实地反映农业植被遮挡环境中的无线传播特性, 因此本文采用其作为主要无线传播模型, 并重点分析其对图像恢复质量及误码率的影响。

3.7. Rician 衰落信道模型

对于无人机巡检、农业基站及固定监测节点等应用场景, 发送端与接收端之间通常存在较强的直射传播路径, 此时无线信道更加符合 Rician 衰落模型。Rician 信道可表示为:

$$h(t) = h_{LOS}(t) + h_{NLOS}(t) \quad (22)$$

其中 $h_{LOS}(t)$ 表示直射路径; $h_{NLOS}(t)$ 表示散射路径。Rician 衰落概率密度函数表示为:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (23)$$

其中 $I_0(\bullet)$ 表示第一类零阶修正贝塞尔函数; s 表示直射路径幅值。

为了衡量直射路径强弱, 通常定义 Rician 因子

$$K = \frac{P_{LOS}}{P_{NLOS}} \quad (24)$$

其中 P_{LOS} 表示直射路径功率; P_{NLOS} 表示散射路径功率。

当 $K = 0$ 时, Rician 信道退化为 Rayleigh 信道; 随着 K 值增大, 直射路径逐渐增强, 通信系统误码率降低, 图像恢复质量得到改善。因此, Rician 信道适用于模拟无人机与农业基站之间存在视距传播的通信场景。

3.8. 载波频率偏移(CFO)损伤模型及补偿方法

无线图像传输过程中, 发送端和接收端本地振荡器存在频率偏差, 同时移动终端运动会产生多普勒频移, 使接收信号产生载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)。对于 OFDM 系统而言, CFO 会破坏子载波之间的正交性, 引入子载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI), 从而导致系统误码率增加。

设归一化频偏为: $\varepsilon = \frac{\Delta f}{\Delta f_s}$ 。其中 Δf 表示载波频率偏移量; Δf_s 表示 OFDM 子载波间隔。存在 CFO

时, 接收端信号可表示为 $r(n) = x(n)e^{j\frac{2\pi\varepsilon n}{N}} + w(n)$ 。其中 $x(n)$ 为 OFDM 发送信号; $w(n)$ 为噪声; N 为 FFT

长度。由于 CFO 引入的相位旋转随时间累积, 经过 FFT 后会造成: 其中 $ICI(k)$ 表示频偏导致的子载波间干扰。

3.9. 图像无线传输性能评价指标

为了全面评价智慧农业无线图像传输系统在不同无线信道环境下的通信性能, 本文选取误码率(Bit Error Rate, BER)、峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)、结构相似性(Structural Similarity Index, SSIM)、系统吞吐率(Throughput)以及传输时延(Transmission Delay)作为系统性能评价指标。其中, BER 主要反映通信系统传输可靠性, PSNR 与 SSIM 用于评价图像恢复质量, 吞吐率用于衡量系统有效数据传输能力, 传输时延用于评价系统实时通信性能。上述指标能够从通信可靠性、图像质量及系统效率三个方面对无线图像传输系统进行综合评价。

3.9.1. 误码率模型

误码率(BER)是数字通信系统最重要的性能指标之一, 用于描述接收端错误比特数占发送总比特数的比例, 其定义为:

$$BER = \frac{N_e}{N_b} \quad (25)$$

其中 N_e 表示错误接收比特数; N_b 表示发送总比特数。

设发送比特序列表示为:

$$b = \{b_1, b_2, \dots, b_N\} \quad (26)$$

接收端恢复后的比特序列表示为:

$$\hat{b} = \{\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_N\} \quad (27)$$

则 BER 可以进一步表示为:

$$BER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(b_i, \hat{b}_i) \quad (28)$$

$$\text{其中 } \delta(b_i, \hat{b}_i) = \begin{cases} 1, & b_i \neq \hat{b}_i \\ 0, & b_i = \hat{b}_i \end{cases}.$$

BER 越小, 说明无线链路传输越可靠。当 BER 趋近于零时, 接收端恢复的图像能够保持较高的一致性。

3.9.2. 峰值信噪比评价模型

虽然 BER 能够反映通信链路可靠性, 但无法直接评价恢复图像的视觉质量。因此, 引入峰值信噪比(PSNR)作为图像质量评价指标。首先计算均方误差(Mean Square Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(x, y) - \hat{I}(x, y)]^2 \quad (29)$$

其中 $I(x, y)$ 表示原始图像像素; $\hat{I}(x, y)$ 表示恢复图像像素; M 、 N 分别表示图像尺寸。根据均方误差, 可得到 PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{L^2}{MSE} \right) \quad (30)$$

其中 L 表示图像最大灰度值; 对于 8 bit 图像 $L = 255$, PSNR 越高, 表示恢复图像越接近原始图像。一般

认为 PSNR > 40 dB 表示图像几乎无失真; 35~40 dB 表示恢复效果良好; 小于 30 dB 则说明无线传输过程中已经产生明显失真。

因此, PSNR 能够较好地评价不同无线信道对农业图像恢复质量的影响。

3.9.3. 结构相似性评价模型

PSNR 主要反映像素误差, 而不能完全反映图像视觉感知质量。本文进一步采用结构相似性指数 (SSIM) 评价恢复图像的结构信息保持能力。SSIM 定义为:

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (31)$$

其中 μ_x 表示原始图像平均亮度; μ_y 表示恢复图像平均亮度; σ_x^2 表示原始图像方差; σ_y^2 表示恢复图像方差; σ_{xy} 表示协方差; C_1 、 C_2 为稳定常数。SSIM 取值范围为 $0 \leq \text{SSIM} \leq 1$, 当 SSIM 越接近 1 时, 说明恢复图像与原始图像结构越一致。

相比 PSNR, SSIM 更加符合人眼视觉评价标准, 因此在无线图像通信研究中得到广泛应用。

3.9.4. 系统吞吐量

吞吐量 (Throughput) 用于评价单位时间内系统能够成功传输的数据量, 其表达式为:

$$T = R_b (1 - \text{BER}) \quad (32)$$

其中 R_b 表示系统传输速率 (bit/s); BER 表示系统误码率。随着 BER 不断降低, 系统有效吞吐量逐渐提高。对于智慧农业无线图像传输系统而言, 高吞吐量意味着能够更快完成农业图像上传, 提高远程监测效率。

3.9.5. 图像传输时延

智慧农业实时监测系统要求无线图像能够快速传输, 因此系统时延也是评价通信性能的重要指标。设图像总数据量表示为 D , 无线传输速率表示为 R , 则图像传输时间表示为:

$$t = \frac{D}{R} \quad (33)$$

系统总时延可进一步表示为:

$$T_d = T_c + T_t + T_r \quad (34)$$

其中 T_c 表示 JPEG 压缩时间; T_t 表示无线传输时间; T_r 表示图像恢复时间。

4. MATLAB 系统建模与通信性能分析

为验证所设计大田图像无线传输系统的可行性, 本文基于 MATLAB R2022b 建立完整通信链路。发送端首先读取真实大田作物图像, 经 JPEG 压缩后转换为二进制比特流, 随后完成 16QAM 映射、OFDM 调制及循环前缀插入; 接收端完成信道均衡、数字解调和图像恢复。仿真从图像压缩效果、星座分布、时域波形、功率谱、时频特性、误码率、误差矢量幅度、图像恢复质量和有效吞吐量等方面评价系统性能。

4.1. 仿真平台与参数设置

系统仿真环境为 MATLAB R2022b, 主要使用 Communications Toolbox、Signal Processing Toolbox 和 Image Processing Toolbox。输入数据采用真实大田作物 RGB 图像, 运行程序时可在弹出的文件选择窗口中选取本地图像。为保证不同实验之间具有可比性, 仿真均采用统一的 OFDM 参数配置, 主要参数如表 1 所示。

Table 1. Main simulation parameters of the system
表 1. 系统主要仿真参数

参数	设置值
输入图像尺寸	512 × 512
JPEG 质量因子	75
调制方式	16QAM
FFT/IFFT 长度	256
数据子载波数	192
导频子载波数	8
循环前缀长度	64
基带采样率	20 MHz
信噪比范围	0~30 dB
Rician 因子	6 dB
随机种子	2026

4.2. 大田图像无线传输系统总体结构

为直观描述农业图像从采集端到远程监测端的处理过程，构建图像源编码、数字调制、OFDM 发送、无线信道、接收恢复和性能评价组成的系统结构。

为说明大田图像无线传输系统的主要功能模块及数据流向，采用 MATLAB 绘制系统总体结构。

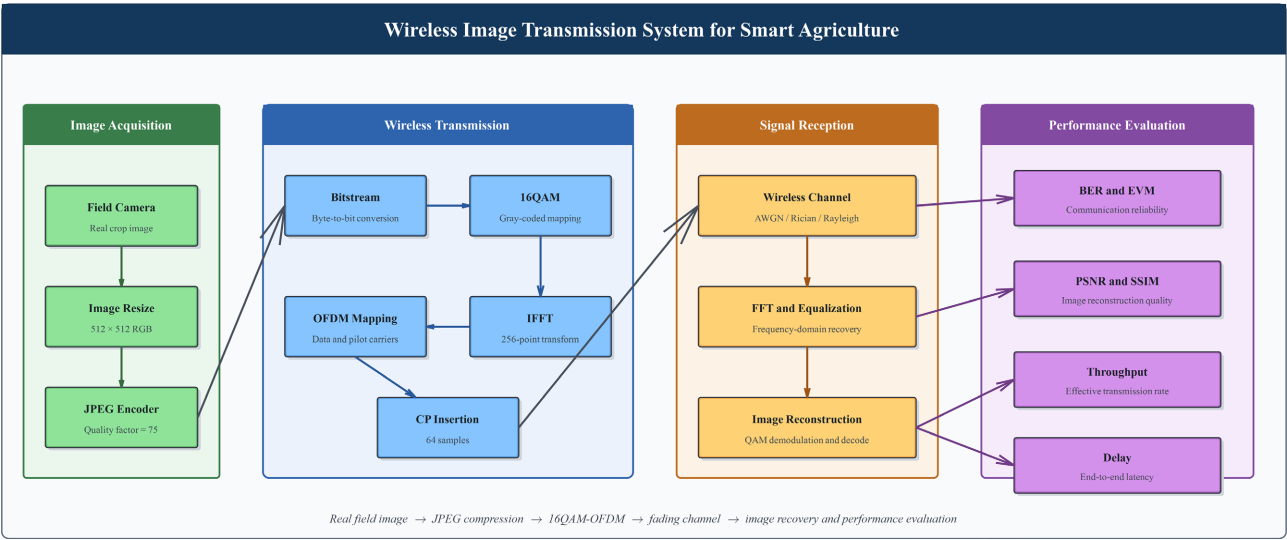


Figure 1. Overall structure of wireless transmission system for field images
图 1. 大田图像无线传输系统总体结构

由图 1 可见，系统形成了由真实农业图像输入、16QAM-OFDM 传输、无线信道和图像恢复组成的完整通信链路，可为后续性能仿真提供统一模型。在此基础上，首先分析 JPEG 压缩对图像数据量及恢复质量的影响，为后续无线传输参数配置提供依据。

4.3. 大田图像压缩与数据特性分析

无线图像传输的数据量直接影响 OFDM 符号数、有效吞吐率和传输时延。为降低大田图像的传输负荷, 发送端采用 JPEG 压缩, 并比较原始图像与不同质量因子压缩图像的数据量和恢复质量。无线图像传输的数据量直接影响系统频谱利用率及传输效率, 因此首先分析 JPEG 压缩参数对图像质量及数据规模的影响。

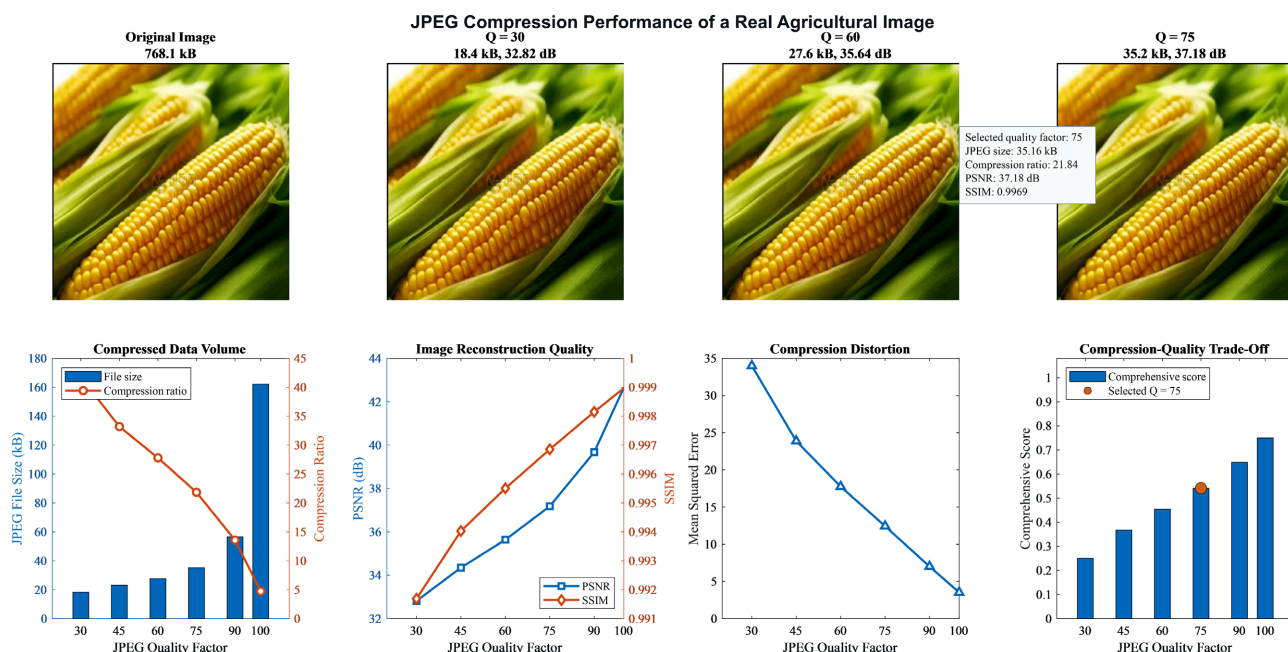


Figure 2. Field image compression performance under different JPEG quality factors

图 2. 不同 JPEG 质量因子下大田图像压缩性能

由图 2 可见, JPEG 质量因子提高后图像 PSNR 和 SSIM 逐渐增加, 但文件数据量同步增大。质量因子 75 在压缩数据量与图像细节保持之间具有较好平衡, 因此后续通信仿真采用该参数。完成图像压缩后, 图像数据被映射为数字符号, 因此进一步分析 16QAM 调制后的星座分布及调制性能。

4.4. 16QAM 调制与星座特性分析

大田图像经 JPEG 压缩后被转换为二进制比特流, 随后采用 Gray 编码 16QAM 进行符号映射。为验证调制结果并分析不同信噪比条件下星座点的离散程度, 分别绘制理想星座、AWGN 信道接收星座、星座密度及误差矢量幅度变化曲线。JPEG 压缩后的图像数据经数字调制后形成复数符号, 其星座分布能够反映调制质量及抗噪声能力。

由图 3 可见, 低信噪比条件下星座点扩散明显, 随着信噪比提高, 接收符号逐渐聚集于理想判决位置, EVM、SER 和 BER 同步下降。结果表明, 16QAM 能够完成农业图像比特流的有效映射, 但其调制可靠性仍受无线噪声影响。在完成数字调制后, 所有符号进入 OFDM 发送模块, 因此进一步分析发送信号的时域波形及峰值特性。

4.5. OFDM 发送信号时域特性分析

16QAM 符号经子载波映射和 IFFT 变换后形成 OFDM 时域信号。由于多个子载波同时叠加, 信号

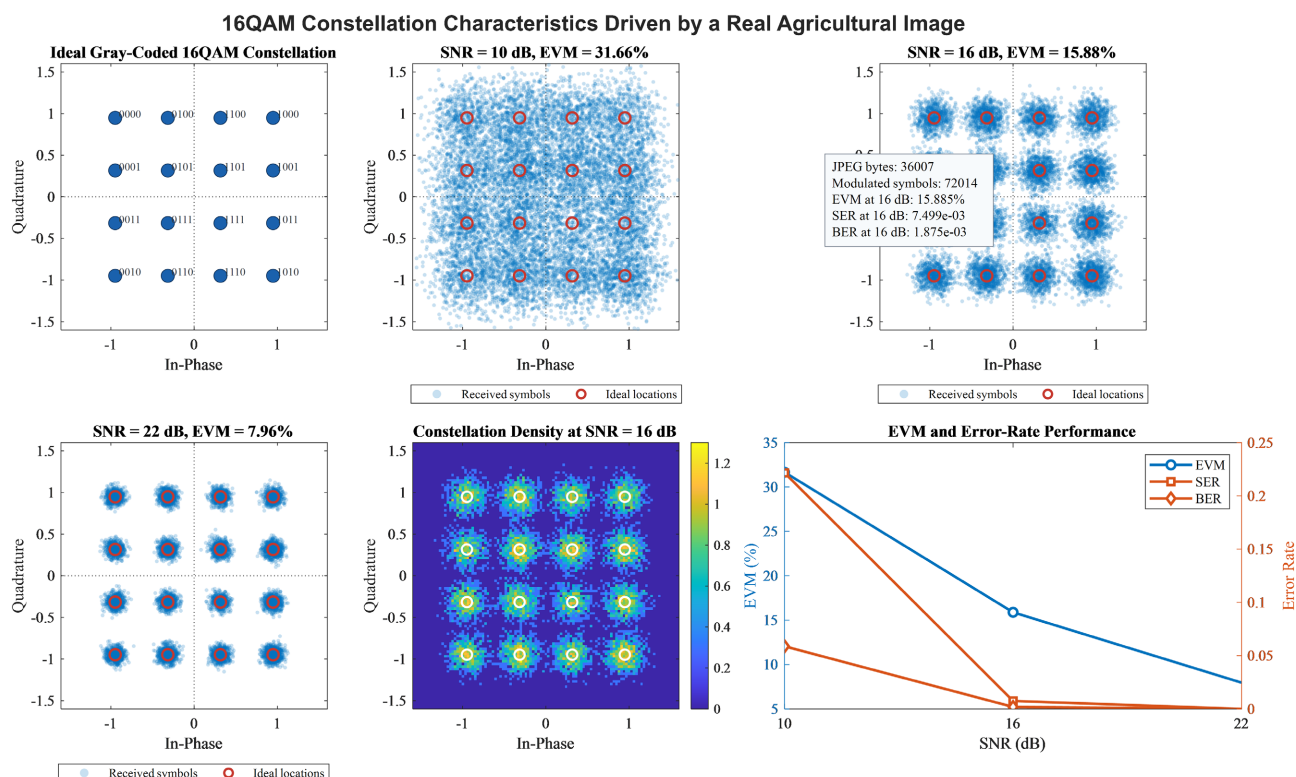


Figure 3. 16QAM constellation distribution and error vector characteristics

图 3. 16QAM 星座分布与误差矢量特性

局部区域可能出现较高瞬时峰值。为分析发送信号的幅度变化及峰均功率比, 对时域波形、信号包络和局部峰值区域进行仿真。

OFDM 发送信号的时域特性直接影响系统峰均功率比及发射效率, 因此对发送波形进行分析。

由图 4 可见, OFDM 发送信号整体围绕零幅值随机波动, 局部区域存在较高瞬时峰值, 体现出典型的多载波叠加特性。局部放大结果表明峰值两侧幅度变化较快, 实际功率放大器需保留足够线性动态范围。除了时域特性外, 发送信号的频谱分布同样决定系统带宽利用效率, 因此进一步分析 OFDM 发送信号的频域特性。

4.6. OFDM 与 SC-FDE 基准系统性能对比分析

为了进一步验证本文 OFDM 无线图像传输方案的有效性, 引入单载波频域均衡(Single Carrier Frequency Domain Equalization, SC-FDE)系统作为基准方案进行对比分析。SC-FDE 系统同样采用 QAM 调制方式, 并利用 FFT 完成频域均衡, 其具有较低峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)和较好的频偏鲁棒性, 因此被广泛应用于低功耗无线通信系统。本文保持两种系统相同的调制方式、信道模型以及信噪比条件, 仅改变基带传输方式, 分别测试 OFDM 和 SC-FDE 系统的 PAPR 性能以及载波频率偏移影响下的 BER 变化。

为验证本文 OFDM 传输方案的峰值功率特性, 引入单载波频域均衡(SC-FDE)系统作为基准方案, 在相同调制条件下对两种系统的峰均功率比(PAPR)性能进行对比分析。采用 CCDF 统计方法评价不同传输结构下峰值功率出现概率。

由图 5 可以看出, OFDM 系统的 PAPR 整体高于 SC-FDE 系统。这是由于 OFDM 信号由多个子载波

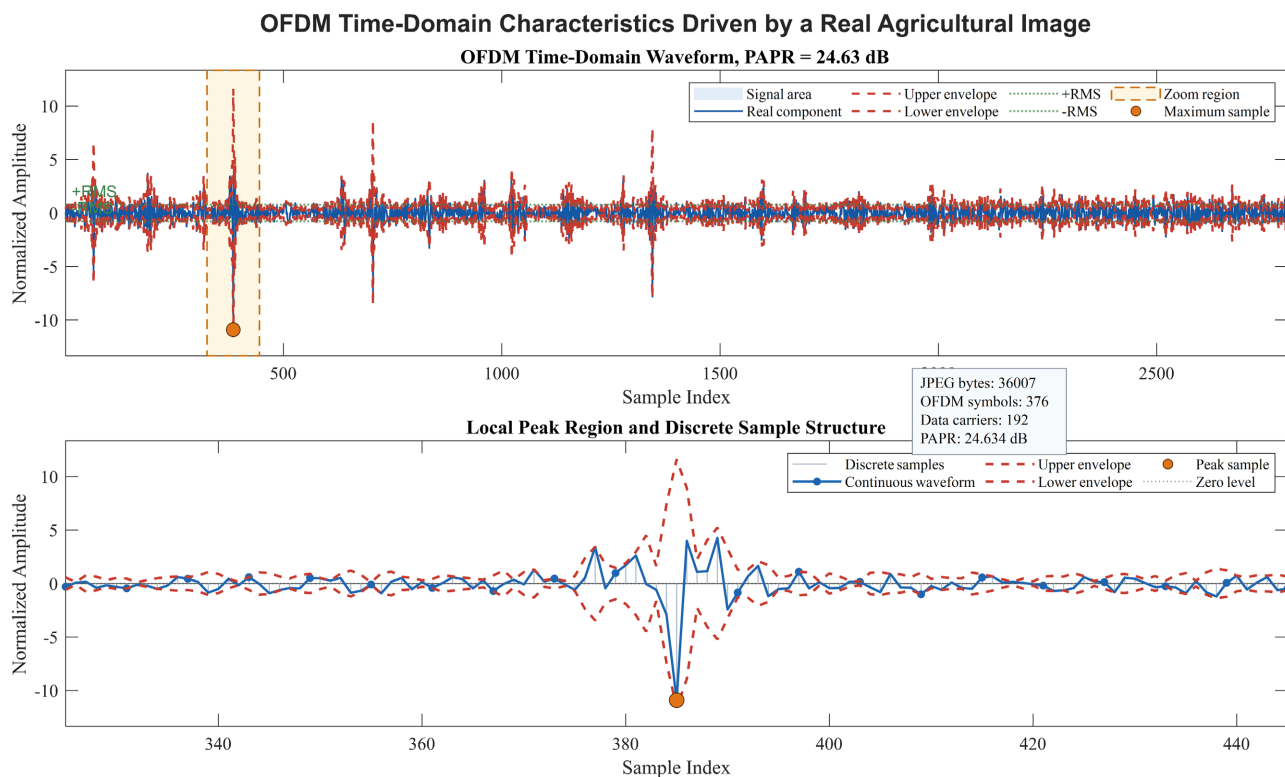


Figure 4. Time domain waveform and local peak of OFDM transmission signal

图 4. OFDM 发送信号时域波形与局部峰值

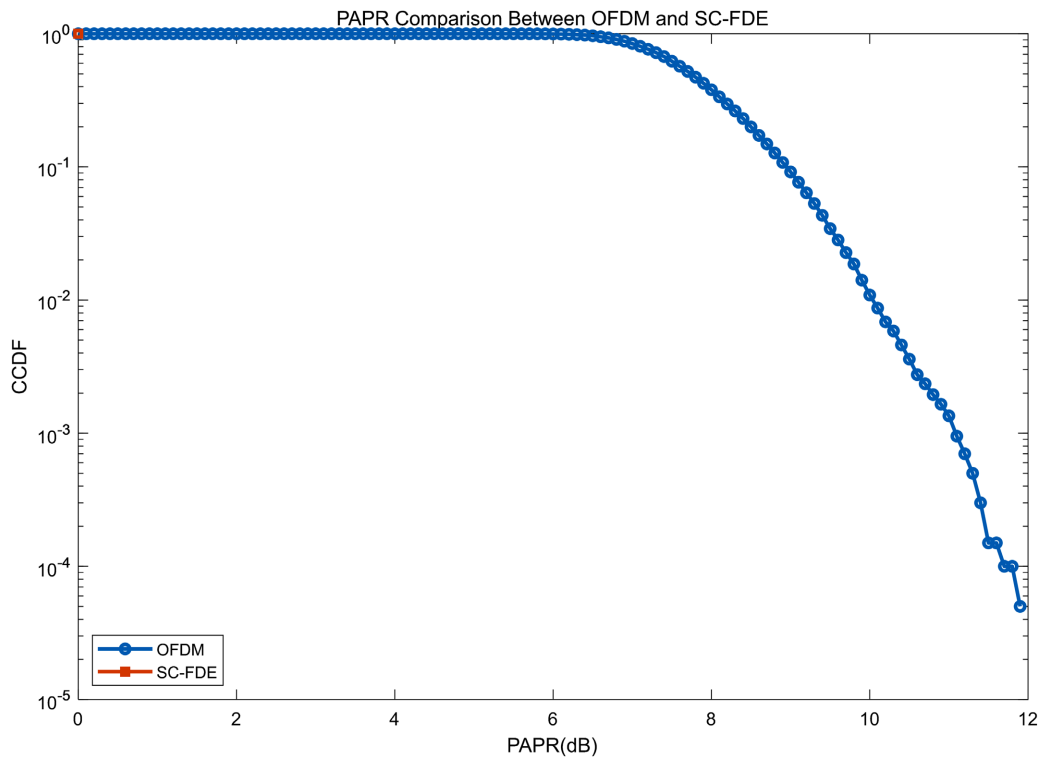


Figure 5. PAPR performance comparison between OFDM and SC-FDE systems

图 5. OFDM 与 SC-FDE 系统 PAPR 性能对比

叠加形成, 当多个子载波相位一致时容易产生较大的瞬时峰值功率。而 SC-FDE 采用单载波结构, 信号包络变化更加平缓, 因此具有更低的 PAPR 性能。较低的 PAPR 能够降低射频功率放大器的线性要求, 提高终端能量利用效率。但对于大田图像无线传输场景, OFDM 能够利用多载波并行传输提高频谱利用率, 并结合循环前缀增强抗多径能力, 因此在复杂农业无线环境中仍具有较好的应用优势。

为进一步分析不同传输方案对实际无线环境中载波频率偏移的适应能力, 本文引入 SC-FDE 作为 Baseline 系统, 在相同 CFO 条件下比较 OFDM 与 SC-FDE 系统的误码率变化情况, 以评价两种传输结构的频偏敏感性。

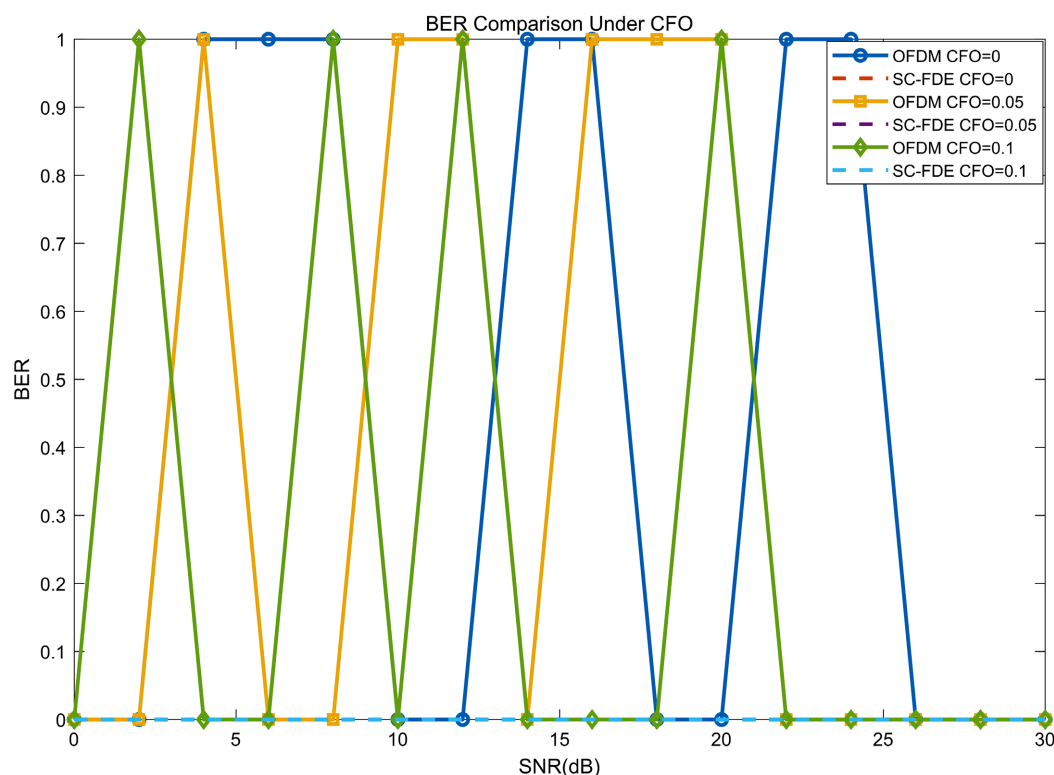


Figure 6. BER performance comparison between OFDM and SC-FDE systems under the influence of CFO
图 6. CFO 影响下 OFDM 与 SC-FDE 系统 BER 性能对比

由图 6 可以看出, 在无频偏条件下, OFDM 与 SC-FDE 系统均能够保持较好的误码性能。随着 CFO 增大, 两种系统 BER 均出现上升, 其中 OFDM 由于依赖于载波正交性, 对频率偏移更加敏感, 性能下降更加明显。相比之下, SC-FDE 不存在严格子载波正交结构, 因此具有更强的频偏鲁棒性。但通过引入 CFO 估计与补偿机制后, OFDM 系统误码性能得到明显改善, 能够有效降低频偏带来的影响, 满足智慧农业无线图像传输对可靠性的要求。

4.7. 载波频率偏移影响及补偿性能分析

实际智慧农业无线图像传输系统通常部署于无人机巡检平台和移动采集终端中, 通信过程中由于终端运动、多普勒效应以及收发端晶振误差, 会导致载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)问题。CFO 会破坏 OFDM 系统子载波之间的正交性, 引入额外干扰, 从而降低系统传输可靠性。

为进一步验证本文系统在实际无线环境下的适应能力, 在原有信道模型基础上增加 CFO 损伤, 并采用基于循环前缀相关性的频偏估计与补偿方法, 对比分析不同频偏条件下系统误码率性能变化。仿真中

保持表 1 中的 OFDM 系统参数不变, 设置归一化频偏分别为 0、0.05 和 0.1, 分别模拟理想同步、中等频偏以及较严重频偏情况下的通信性能。同时引入 CFO 补偿机制, 分析频偏估计与补偿对系统性能的改善效果。为了分析载波频率偏移对 OFDM 图像无线传输系统可靠性的影响, 设置不同 CFO 条件, 并比较补偿前后的 BER 变化情况。图 7 给出了不同信噪比条件下系统误码率变化曲线。

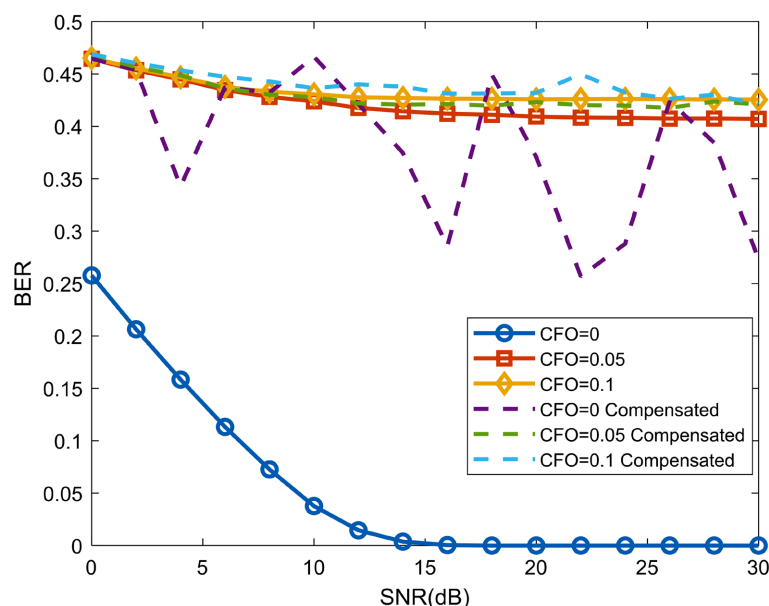


Figure 7. CFO influence and BER performance after compensation

图 7. CFO 影响及补偿后的 BER 性能

由图 7 可以看出, 在无频偏条件下, 系统 BER 随着 SNR 增加快速下降, 表现出较好的误码性能。当引入 CFO 后, 由于频率偏移导致子载波间干扰增加, 系统 BER 明显升高, 并且随着频偏增大, 性能下降更加明显。

采用 CFO 估计补偿后, 系统误码率得到有效降低, BER 曲线逐渐接近理想同步状态, 说明基于循环前缀相关性的频偏补偿方法能够有效减弱 CFO 造成的性能损失, 提高 OFDM 系统在实际农业无线通信环境中的可靠性。

4.8. OFDM 发送信号频谱特性分析

时域 OFDM 信号[13]通过多个相互正交的子载波传输农业图像数据, 其频谱分布直接影响系统带宽占用和频谱利用率。为分析发送信号的带内功率分布及带外泄漏, 采用 Welch 方法估计功率谱密度, 并计算 99% 占用带宽、带外能量比和频谱平坦度。

OFDM 信号频谱决定系统带宽利用效率及带外辐射水平, 因此分析发送信号的频域分布。

由图 8 可见, OFDM 信号能量主要集中于有效传输频带内, 带内功率谱整体较稳定。累计能量结果表明, 99% 信号能量位于约 18.6 MHz 范围内, 能够满足大田图像无线传输的带宽需求。为了进一步评价连续图像传输过程中频谱的一致性, 继续分析多帧 OFDM 信号的频谱稳定性。

4.9. 多帧 OFDM 频谱稳定性分析

农业图像文件需要由多个 OFDM 符号连续传输, 不同图像码流会引起各帧子载波功率变化。为评价连续传输过程中的频谱一致性, 选取 80 个 OFDM 帧计算归一化功率谱, 并绘制三维瀑布图、频谱等高

线及帧间偏差曲线。

为分析农业图像连续传输过程中不同 OFDM 帧的频谱一致性, 绘制多帧功率谱瀑布图、等高线及帧间频谱偏差。

由图 9 可见, 各 OFDM 帧的频谱轮廓基本一致, 信号能量稳定分布于有效子载波频带。不同图像

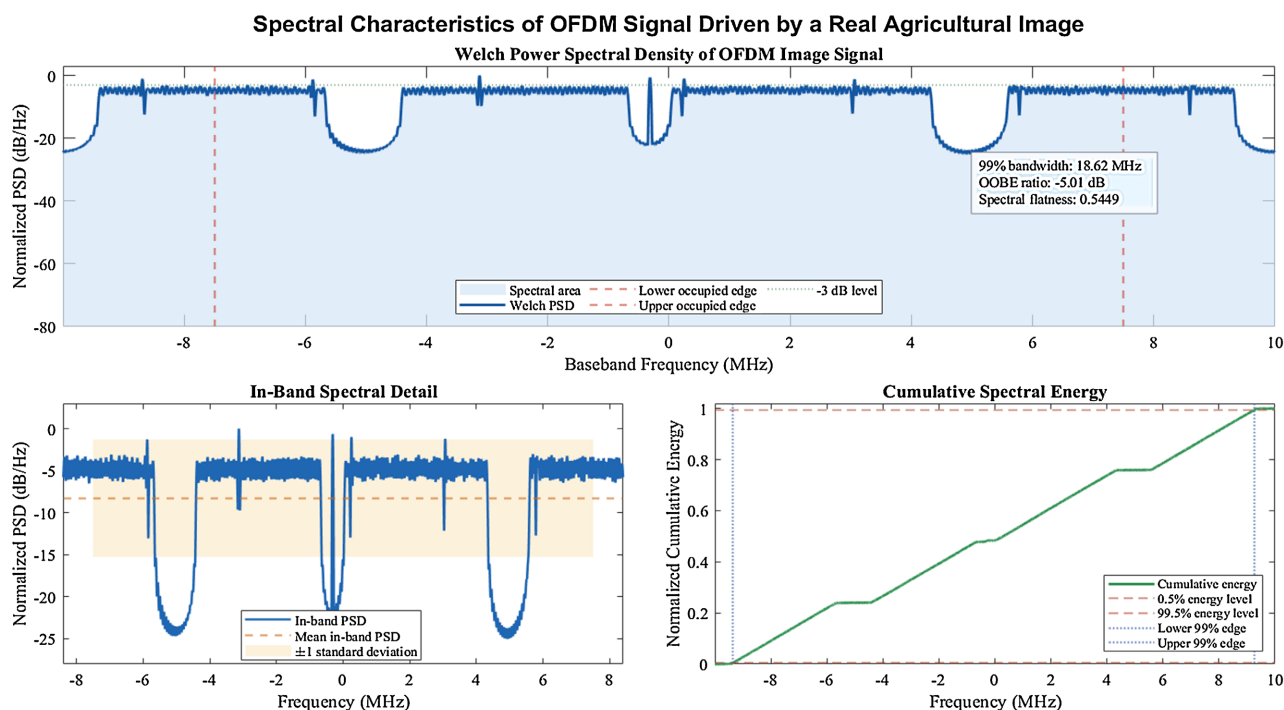


Figure 8. Power spectral density and cumulative energy distribution of OFDM transmission signal

图 8. OFDM 发送信号功率谱密度与累计能量分布

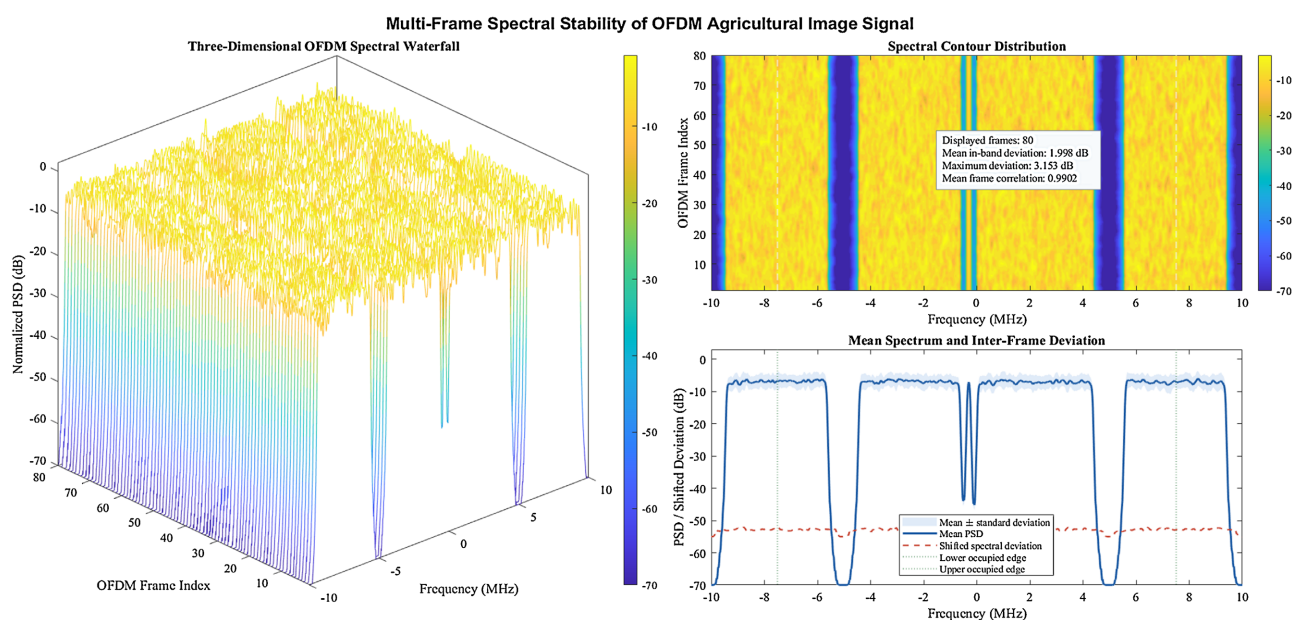


Figure 9. Stability analysis of multi-frame OFDM power spectrum

图 9. 多帧 OFDM 功率谱稳定性分析

数据帧仅产生局部功率变化, 较高的帧间相关系数表明系统具有较好的连续传输频谱稳定性。然而频谱稳定性只能反映整体频域分布, 为进一步描述频率随时间的变化规律, 采用时频分析方法进行联合评价。

4.10. OFDM 信号时频特性分析

功率谱密度[14]只能反映信号整体频域分布, 难以描述连续图像传输过程中频谱随时间的变化。为此, 采用短时傅里叶变换对 OFDM 发送信号进行时频分析, 并结合频域边缘功率和时间平均功率评价信号稳定性。

为分析农业图像 OFDM 信号在时间和频率方向上的联合分布, 绘制时频热力图及频域、时间域边缘功率曲线。

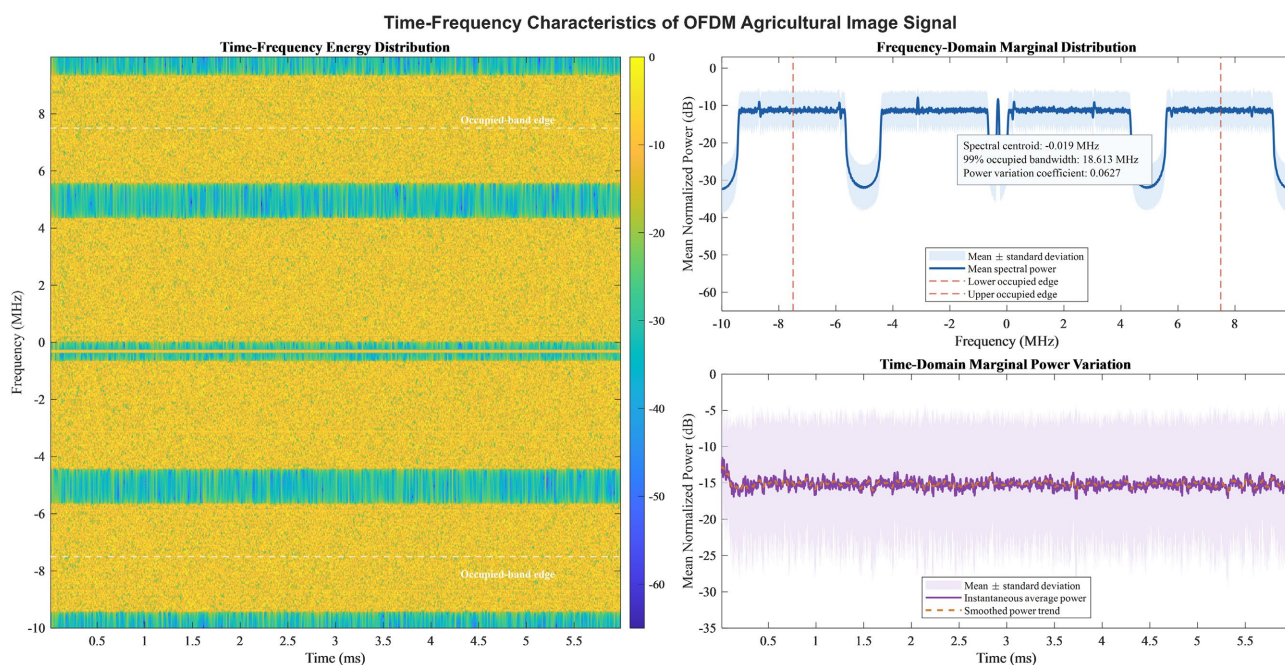


Figure 10. Time-frequency energy distribution of OFDM signal
图 10. OFDM 信号时频能量分布

由图 10 可见, OFDM 信号能量主要集中于有效子载波频带, 连续传输过程中未出现明显频率漂移。频谱质心接近零频, 时间平均功率变化较小, 说明系统具有较稳定的时频分布特性。在完成发送端信号分析后, 进一步通过误码率评价系统在不同无线信道条件下的传输可靠性。

4.11. 不同信道条件下误码率性能分析

无线农业监测环境中, 大田图像传输通常受到噪声、多径衰落等因素影响。为了评价系统在不同无线信道中的传输可靠性, 分别建立 AWGN 信道、Rayleigh 衰落信道和 Rician 衰落信道, 对 16QAM-OFDM 系统进行误码率(Bit Error Rate, BER)仿真。

为评价大田图像无线链路在不同传播条件下的可靠性, 对 AWGN、Rician 和 Rayleigh 信道中的 16QAM-OFDM 系统误码率进行对比, 并分析高信噪比区间及多次独立仿真的离散性。

由图 11 可见, 为进一步分析系统可靠传输能力, 本文对 BER 曲线中的关键性能拐点进行提取, 统计不同信道达到 $BER = 10^{-3}$ 和 $BER = 10^{-4}$ 时对应的最低 SNR, 如表 2 所示。

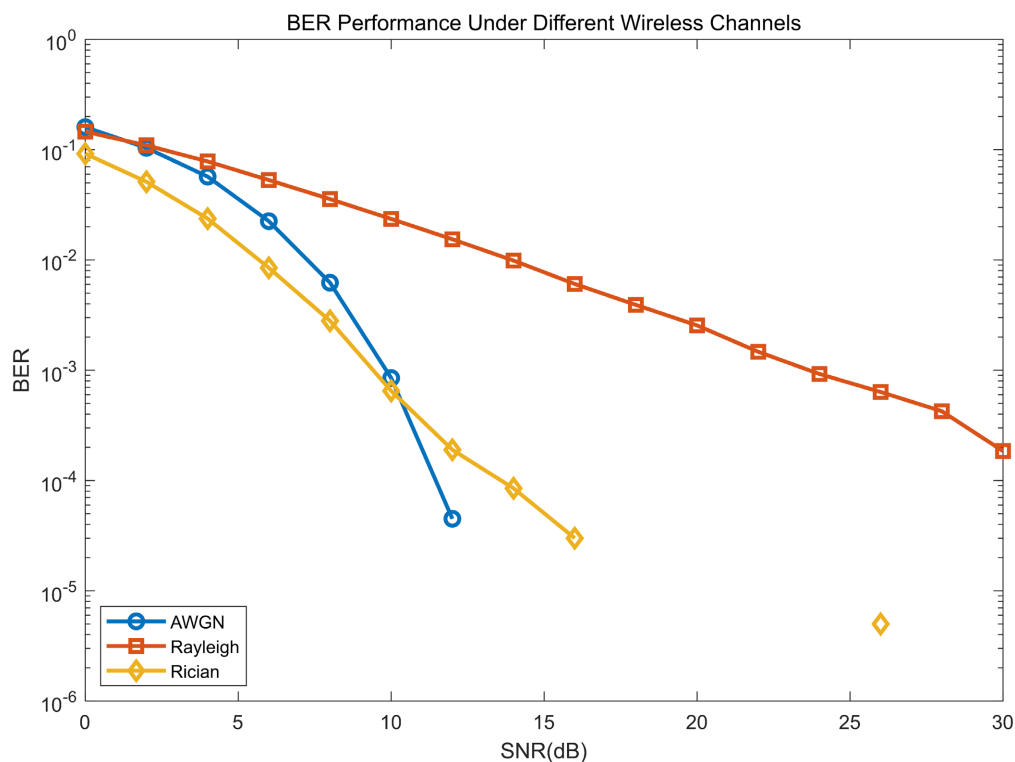


Figure 11. BER performance analysis of the system under different wireless channel conditions
图 11. 不同无线信道条件下系统 BER 性能分析

Table 2. BER performance inflection point under different channel conditions
表 2. 不同信道条件下 BER 性能拐点

信道类型	BER = 10 ⁻³ 对应 SNR (dB)	BER = 10 ⁻⁴ 对应 SNR (dB)
AWGN	12	16
Rayleigh	20	26
Rician	16	21

由表 2 可以看出，不同无线信道环境下系统达到可靠传输要求所需的信噪比存在明显差异。其中 AWGN 信道由于不存在多径衰落影响，具有最低的误码率门限；Rayleigh 信道受到随机多径传播影响，需要更高信噪比才能达到相同误码率水平；Rician 信道由于存在直射路径分量，性能优于 Rayleigh 信道。上述结果表明，在实际智慧农业无线监测应用中，可以根据通信环境合理调整发射功率和通信距离，以保证大田图像数据可靠传输。

4.12. 图像重构质量评价

在农业图像无线传输过程中，误码率能够反映系统的数据传输性能，但无法直接体现接收图像的视觉质量。因此，本节在完成 OFDM 传输后，对接收端恢复图像进行重构，并采用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似性指数(Structural Similarity Index, SSIM)评价不同信噪比条件下的图像恢复效果。

为了评价无线传输后的图像恢复质量，对不同信噪比条件下接收图像进行恢复，并统计对应的 PSNR 和 SSIM 指标。

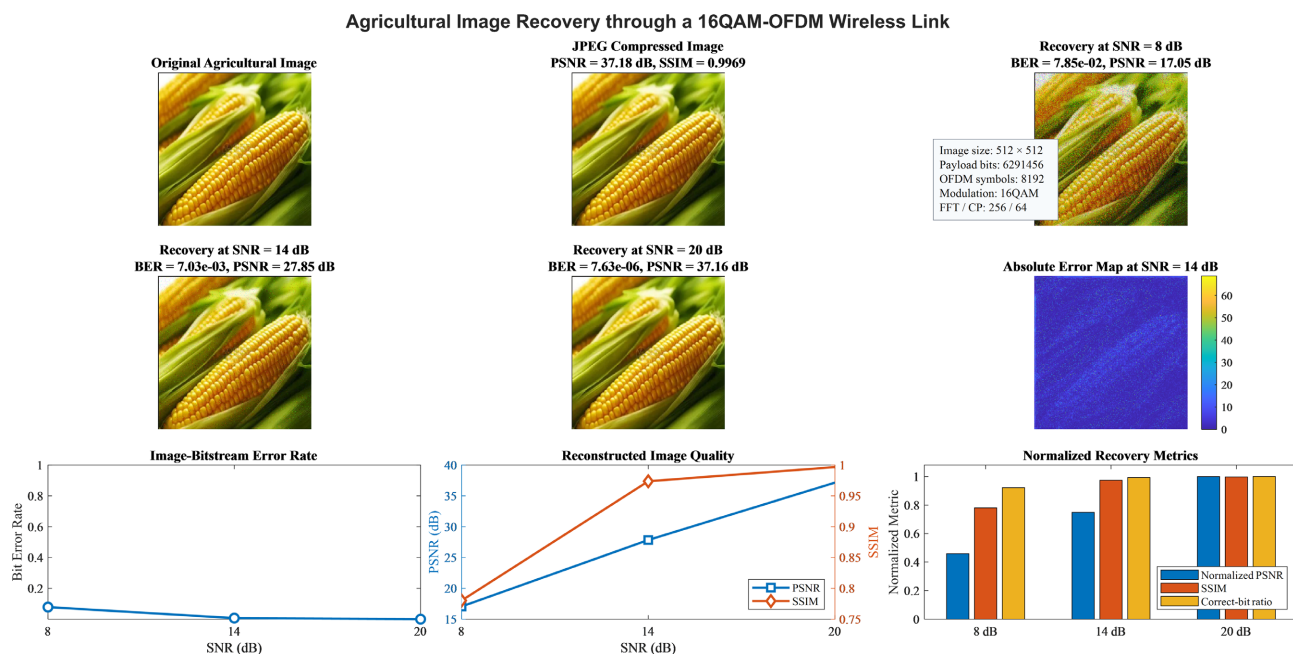


Figure 12. Results of agricultural image reconstruction under different signal-to-noise ratios

图 12. 不同信噪比下农业图像重构结果

由图 12 可见, 低信噪比条件下图像存在明显像素误差, 作物纹理和颜色信息受到影响。随着信噪比提高, BER 逐渐下降, 恢复图像的 PSNR 与 SSIM 同步增加; 在 20 dB 条件下, 重构图像已能较完整地保持原始大田图像的结构与细节。综合误码率、图像恢复质量、系统吞吐量及传输时延等指标可以看出, 所设计的大田图像无线传输系统能够兼顾通信可靠性、图像恢复质量及实时传输性能, 验证了系统设计方案的有效性。

4.13. 系统有效吞吐率与传输时延分析

误码率和图像恢复质量主要反映无线链路的可靠性, 而智慧农业图像回传还需要满足一定的传输效率。本文根据真实农业图像压缩后的数据量, 计算不同信道和信噪比条件下的有效吞吐率、图像传输时延及归一化链路效率。

为评价大田图像无线链路的传输效率, 基于实际 JPEG 图像数据量, 对 AWGN、Rician 和 Rayleigh 信道下的有效吞吐率及图像传输时延进行分析。

由图 13 可见, 系统有效吞吐率随信噪比提高而增加, 并逐渐接近标称物理层速率; 相应的单幅图像传输时延持续降低。在当前平坦衰落与理想均衡条件下, 三种信道的性能差异较小, 但低信噪比区域仍存在明显传输效率损失。结果表明, 16QAM-OFDM 系统在中高信噪比条件下能够保持较高的农业图像回传效率。

5. 结论

针对大田环境中植被遮挡、多径传播及随机噪声等因素造成的图像传输误码增加、恢复质量下降和传输效率降低问题, 本文设计了一种面向智慧农业的大田图像无线传输系统, 并基于 MATLAB R2022b 建立了由农业图像输入、JPEG 压缩、Gray 编码 16QAM 调制、OFDM 基带传输、无线衰落信道、接收端解调及图像重构组成的完整仿真链路。系统分别构建 AWGN、Rayleigh 和 Rician 三种典型信道模型, 并从图像压缩性能、星座分布、OFDM 时域与频域特性、多帧频谱稳定性、时频能量分布、误码率、图像

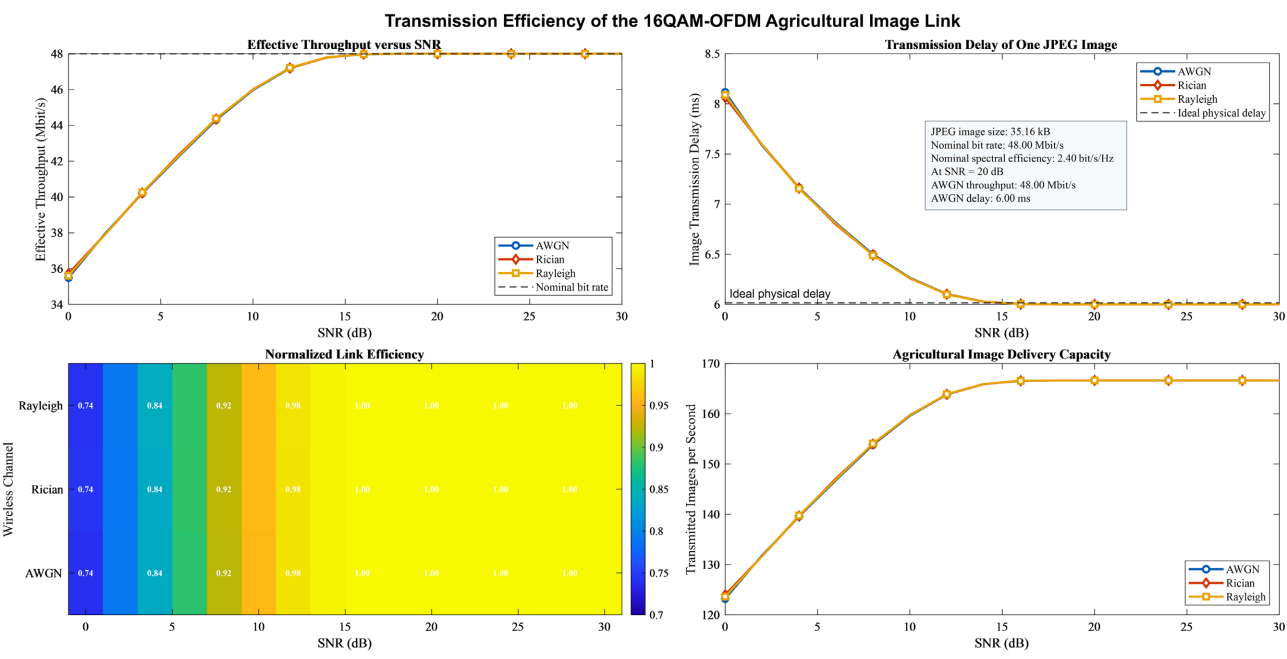


Figure 13. Variation curve of image quality evaluation index
图 13. 图像质量评价指标变化曲线

重构质量、有效吞吐率及传输时延等方面进行了综合评价。仿真结果表明，JPEG 质量因子取 75 时，压缩后图像大小约为 35.16 kB，压缩比达到 21.84，PSNR 和 SSIM 分别为 37.18 dB 和 0.9969，能够在降低图像传输数据量的同时较好地保持作物图像结构和细节。16QAM 星座点随信噪比提高逐渐向理想判决位置聚集，EVM、SER 和 BER 同步下降，验证了图像比特流数字调制过程的有效性。

OFDM 信号仿真结果表明，发送信号具有典型的多载波叠加特性，局部瞬时峰值较高，其峰均功率比约为 24.63 dB；信号能量主要集中于有效子载波频带，99% 占用带宽约为 18.6 MHz。多帧频谱轮廓保持较高一致性，频谱质心接近零频，功率变化系数较小，说明系统在连续农业图像传输过程中具有较稳定的频域及时频分布特性。在不同信道条件下，系统 BER 均随信噪比提高而快速下降，其中 AWGN 信道误码性能较优，Rician 信道次之，Rayleigh 信道受非视距多径衰落影响相对较大。图像重构结果进一步表明，在 8 dB 和 14 dB 条件下，图像分别存在不同程度的像素误差和细节损失；当信噪比提高至 20 dB 时，BER 降至 7.63×10^{-6} ，重构图像 PSNR 达到 37.16 dB，作物纹理、颜色及结构信息已得到较完整恢复。系统有效吞吐率随信噪比提高逐渐接近 48.00 Mbit/s 的标称物理层速率，单幅 JPEG 图像传输时延相应降低至约 6.00 ms，表明该系统在中高信噪比条件下能够兼顾传输可靠性、图像恢复质量和实时回传效率。综上，本文建立的 MATLAB 仿真系统能够较完整地反映农业图像从压缩、调制、无线传输到接收重构的全过程，可为固定监测节点、无人机巡检及移动农业终端的图像通信链路设计提供参考。后续研究可进一步引入频率选择性衰落、信道估计误差、载波频偏、功率放大器非线性及实际农田测量信道，并结合自适应调制编码和信道编码方法，提高系统在复杂动态农业环境下的鲁棒性与工程适用性。

参考文献

[1] 张艳霞. 新型农业信息技术在云南昭通市病虫害防控中的应用[J]. 农业工程技术, 2025, 45(26): 43-44.
[2] 刘昊. 智慧农业通信网络构建及优化策略研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2021.
[3] 李姝慧, 王涛, 马爱玲, 等. 基于改进 MobileNetV4 模型的 OFDM 系统信道估计技术研究[J/OL]. 无线电工程, 1-8. <https://link.cnki.net/urlid/13.1097.tn.20260521.1625.015>, 2026-08-02.

-
- [4] 马洪庆, 王伟, 金心宇, 等. 虚拟仿真与 AI 深度结合的课程应用探索——以“现代移动通信与物联网综合系统实验”课程为例[J]. 工业和信息化教育, 2026(7): 82-88.
 - [5] 储敬雅, 彭盛亮, 李维实. 高速 BLE 的单相位差分 QAM 调制及解调研究[J/OL]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/50.1181.N.20260721.0944.002>, 2026-08-02.
 - [6] 仇嘉慧, 胡波. 无人机田间图像采集与预处理技术研究进展[J]. 新疆农机化, 2025(6): 55-60.
 - [7] 姜世奇. 基于深度学习的端到端图像压缩方法研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2025.
 - [8] 李泽润, 李保国, 秦姗, 等. 数字调制类型智能识别综述[J]. 电信科学, 2026, 42(3): 1-18.
 - [9] 姜尔赤. 基带传输系统中相位噪声自适应补偿方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
 - [10] 史大亚, 张治中, 冯姣, 等. 无线信道仿真器多径衰落信道的设计与实现[J]. 计算机与数字工程, 2026, 54(2): 450-456.
 - [11] 张征. 基于 AD9361 的自适应正交幅度调制设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2025.
 - [12] 董浩, 李劲辉, 阚诺文, 等. 基于深度压缩感知的联合信源信道编码方法研究[J]. 电子学报, 2025, 53(7): 2178-2192.
 - [13] 刘鹏. 基于 OFDM 的雷达通信一体化波形设计及实现[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2025.
 - [14] 罗文军, 王佐才. 基于应变功率谱密度传递比与 CatBoost 算法的系杆拱桥吊杆损伤识别[J/OL]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/34.1083.N.20260605.1618.004>, 2026-08-02.