

基于叠加导频的雷达与通信一体化 信号处理算法研究

许蔚然

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要: MIMO-OFDM 技术日益成熟, MIMO 系统为雷达通信一体化系统提供了硬件支持, OFDM 调制为通信感知一体化系统提供了合适的调制方法; 传统通信系统的接收方只接收通信信息而浪费了携带的信道信息, 后者正是雷达系统所需的信息, 通信感知一体化系统也提高了信息利用率; 在通信感知一体化系统的存在诸多不同形式中, 采用了叠加导频的系统, 验证了叠加导频相较于传统导频策略的优越性, 并研究了基于叠加导频的雷达系统的性能; 直接使用香农公式计算通信雷达融合信道的信道容量, 并研究两部分功率比对于系统互信息的影响。

关键词: 叠加导频; 雷达系统; 通信系统; 通信感知一体化系统; 信道容量

Research on Integrated Signal Processing Algorithm for Study of Integrated Radar and Communication System Based on Superimposed Pilot

XU Weiran

(School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The system technology of multiple-input multiple-output and orthogonal frequency division multiplexing (MIMO-OFDM) is becoming more and more getting mature more and more. MIMO system provides physical support for integrated radar and communication systems, while OFDM modulation provides appropriate modulation methods suitable measure for integrated communication perception systems communication. In traditional, communication systems only receive the communication information merely, ignoring the carried leaving channel information aside, the latter is exactly the information required by which is precisely the radar system requires. Thus, the integrated radar and communication systems also improve the utilize information utilization more effectively in this way. There are different forms of integrated radar and communication systems. Nevertheless, this article underlines the superimposed based upon superimposed pilot system is used to verify, researching and demonstrating the superiority of superimposed pilot compared to over traditional pilots, and study and the splendid performance of its radar system based on the superimposed pilot. Shannon equation is directly applied to calculate one of the innovative point this article introduce is the calculation of the channel account of information account of of integrated communication radar fusion and channel directly by Shannon Equation, as well as the research study on the influences of two power ratios on of the radar and the system mutual information communication system on channel capacity.

Keywords: superimposed pilot; radar system; communication system; integrated radar and communication perception system; channel capacity

0 引言

在 6G (第六代移动通信标准, Sixth Generation Mobile Communications) 通信中, 更高的频段、更宽的带宽和大规模天线阵列实现了高精度传感和通信的集成。无线通信和传感根据电磁波原理运行, 可在人类活动的关键场景中实现无缝覆盖。在发射端, 电磁波信号经过调制后携带源信息。在整个传播过程中, 信号会受到无线环境的影响, 并通过这种调制有效地携带环境信息。通过分析电磁波信号, 接收器不仅可以检索信号源信息, 还能提取反映传播环境特征的感知细节^[1]。电磁波信号固有的这种通信和感知双重功能使这两方面得以融合, 被称为通信感知一体化。

雷达和通信系统并非完全独立。二者原理上都利用了电磁波携带的信息, 在硬件架构、信号处理等方面均有共通之处, 这就为通信网络中融入感知提供了可能, 并且能够较大程度降低对现网的改动成本, 这种一体化的设计能够获得“集成增益”。另一方面, 在未来的通信中频谱资源愈发紧张, 下一代无线通信系统希望复用雷达频段, 实现雷达和通信频谱共享, 提高频谱利用率; 另外, 通信与感知系统能够相互协作增益。

传统通信系统中, 接收端只需要发送端的通信信息, 但是在双方通信过程中接受到的信道信息则被舍弃, 因此浪费了一定的信息量; 而传统雷达系统只关心收发过程中

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-04-17。

作者简介: 许蔚然(2003-), 男, 大学本科生。

引用格式: 许蔚然. 基于叠加导频的雷达与通信一体化信号处理算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 276-285.

产生的信道信息，其收发的电磁波不带有通信信息。而通信感知一体化系统中同时利用了通信信息和信道信息，提高了信息利用率。

通信基站是无线电台的一种形式，是指在一定频率的电磁波的覆盖范围内，通过移动通信交换中心与移动电话终端进行信息传输的无线电收发站。

传统集成系统通常采用一个基站发送另一个基站接受的通信模式，而传统雷达传感系统通常采用自发自收的接收模式。后者可降低网络复杂性和波束扫描开销。在更高的频段，尤其是毫米波和太赫兹波段，对自发自收的接收模式的需求尤为迫切。

在未来智能化社会的趋势下，社会生活中的信息感知需求愈发灵活多变，雷达与通信一体化研究综合传感与通信技术在智能化社会的多个领域中可以有广泛的应用。譬如，在物联网领域，将日常物品连接到互联网，以收集和共享数据，实现更智能、更自动化的流程；在智能城市领域，利用传感器和通信技术一体化提高城市基础设施的效率，如交通管理、废物管理和能源消耗；在工业自动化领域，生产流程中可采用集成传感和通信技术，以优化生产、监控设备健康状况并提高整体效率；在医疗保健领域，医疗设备中集成传感器，用于监测病人的健康状况，并将数据传输给医疗服务提供者，以便进行远程监控，在环境监测领域，部署传感器，收集空气和水质等环境条件的数据，并传输这些信息，供分析和决策使用。

近年来，人们逐渐意识到通信与感知两个系统可以协作互联。Xia 等人^[2]基于正交频分复用技术（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）设计了一种多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）雷达，并在信号编码中引入保护间隔 CP（循环前缀, Cyclic Prefix）。同时也有研究团队基于数据失真设计了一种适用于通信感知一体化系统的 OFDM 波形^[3]。OFDM 技术如今被广泛应用于数字电视广播、无线局域网等领域，具有包括灵活的多载波调制、接收机处理增益的可用性、易于同步和均衡等优点。MIMO 系统的信道估计方法有很多，应用较为广泛的一种是 EM 算法^[4]。

然而 MIMO-OFDM 技术也同时存在一定的局限。Liu 等人^[5]研究了 MIMO-OFDM 系统的局限性，并优化方法得到合适的系统参数。Li 等人^[6]研究了 high UHF 雷达系统与 GSM 通信系统的相互影响，并基于矩阵完成 MIMO 雷达系统与 MIMO 通信系统的频谱共享与减小两者干扰的问题。MIMO 雷达的另一个问题在于多径输出带来的频谱拥塞，文献 [7] 提出了优化空间的加权矩阵方法。

雷达通信一体化系统中存在的重要问题是通信系统与雷达系统的分配协作问题。文献 [8] 提出了发射波束形成的旁瓣控制使通信链路能够使用相同的脉冲雷达频谱。文献 [9] 构建了单一收发机实现毫米波应用的物理系统，为后续研究提供了思路。夏文超等人^[10]以工业物联网为情景在基于叠加导频的短包传输中讨论了功率优化的问题。

Huang 等人^[11]从波形设计和雷达辐射方向图分析的视角改进了系统误码率。多载波信号的功率分配算法有很多，文献 [12] 给出了几种算法在不同场景完成了功率分配的优化。

本研究的创新点集中在雷达与通信的联合感知。传统意义上的雷达系统与通信系统互不相关，雷达与通信的电子系统完全不同，通信的波段在，而雷达使用的波段大多在 30~300 kHz，而通信的波段在 MHz 甚至 GHz 数量级。传统通信与雷达的发射时间不协调，并不是同时发射在同一个载波中。通信与雷达的信号功率不用加以互相协调，不需要考虑功率分配的问题。

本文的研究统一的导频和信号，用相同的波形传输，用不同的方式编码和解码，做到一个系统同时完成通信与感知。

传统雷达系统不需要研究信息量，只关心回波信号的特性带来的目标信息，对于信道和信道容量则毫不关心。而传统通信系统，尤其是 MIMO 系统中进行信道分析的算法有很多，例如 EM 算法^[13]。在本文的研究中，我们把雷达系统看成一个特殊的通信系统，作为通感一体化系统的一部分，直接利用香农公式计算融合信道的信道容量，从而进一步分配通信与感知两部分的功率比。

1 研究原理

1.1 OFDM（正交频分复用技术）

1.1.1 正交频分复用（OFDM）

正交频分复用技术（OFDM）是一种多载波调制方案，通过多个正交子载波传输数据。传统的传输方式只使用一个载波调制所有要发送的数据，但 OFDM 则是将要发送的数据分割成小块，将每个子数据流分配给一个子载波，数据通过平行的正交子载波发送。这就是“频分”的含义。由于每个子载波上的所有数据都是同时传输的，因此我们可以说这是一种“多路复用”。

$X_l[k]$ 表示第 k 个子载波的第 l 个发送信号，假定每一个符号的时间是的时长是 T_s ，则单个 OFDM 符号持续时间 $T_{sym} = NT_s$ ^[14]。

$$x_l = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k (t - t_{sym})} \quad (1)$$

这与离散傅里叶逆变换的形式是一致的，因此可以用离散傅里叶变换实现信号的 OFDM 调制。

OFDM 有效利用了可用频谱，克服了传统多载波系统的局限性。与为消除载波间干扰而采用非重叠子载波的传统系统不同，OFDM 允许子载波频谱重叠，从而实现了较高的频谱效率。通过选择特定的间距，确保子载波之间的正交性，从而管理这种重叠，使得他们不会互相干扰。

1.1.2 循环前缀 CP

循环前缀 CP 就是将信号的最后一部分移到信号的最前端，将线性卷积运算转换为圆卷积，以提高采样时的容错率。换言之，如果不加循环前缀 CP，采样时只有恰好采在一段 OFDM 信号的起始点才能正确解码，若添加 CP，则只

需要落入 CP 中的一段即可。但是另一方面，CP 过长也会导致信息传输效率下降，因此需要控制循环前缀的长度。

1.2 传统导频策略

在 OFDM 系统中，发射机将信息比特序列调制为 PSK (phase-shiftkeying, 频移键控) /QAM 符号，然后相对应的符号做 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, 快速傅里叶逆变换) 变换为时域信号，最后通过信道发送出去。由于信道特性对信息信号存在一定的影响，接收机需要对信道带来的畸变做出补偿。由于 OFDM 调制信号的正交性，接受信号的每一个子载波分量可以表示为发射信号与信道频率响应的乘积，即：

$$x_k = X_i[k]e^{2\pi f_i t} \quad (2)$$

$$y_k = x_k h_k \quad (3)$$

其中： y_k 为第 k 个接收信号， h_k 为响应的信道频率响应。因此所有 OFDM 子载波所传递的信号都满足：

$$\mathbf{Y}_l = \mathbf{X}_l \mathbf{H}_l^T \quad (4)$$

其中： $\mathbf{Y}_l = \begin{bmatrix} y_{1l} \\ y_{2l} \\ \vdots \\ y_{nl} \end{bmatrix}$ ，表示 n 个接收端 OFDM 子载波携带

的第 l 个信息信号形成的矩阵， $\mathbf{X}_l = \begin{bmatrix} x_{1l} \\ x_{2l} \\ \vdots \\ x_{nl} \end{bmatrix}$ ，表示 n 个发送

端 OFDM 子载波携带的第 l 个信息信号形成的矩阵， $\mathbf{H}_l =$

$\begin{bmatrix} h_{1l} \\ h_{2l} \\ \vdots \\ h_{nl} \end{bmatrix}$ ，表示这 n 个子载波信号发送第 l 个信息信号时传输的信道信息矩阵^[15]。

因此通过估计每个子载波的信道响应就可以恢复发射的信息信号。总体来说，可以运用发射机与接收机都已有的导频 (Pilot) 符号进行信道估计。传统的导频策略有块状导频与梳状导频。

1.2.1 块状导频

块状导频是一种时域插值的导频。块状导频在时域上周期性地发射 OFDM 信号，每个导频符号的所有的子载波都用作导频。利用这些导频在时间轴插值，在时域上估计信道。

由于块状导频是时域上周期性插入每个子载波，因此块状导频适用于频率选择性信道；另一方面，对于快速衰落信道，在一定的插值周期内，块状导频并不能准确地反映信道特性，此时需要缩短插值周期，增加更新频率以获得信道信息，但是会极大增加系统复杂度，因此块状导频不适用于时域变化较大的信道。

1.2.2 梳状导频

梳状导频是一种频域插值的导频。梳状导频在每个 OFDM 符号的子载波上周期性地插入导频信号，利用这些导频信号在频域上周期性地插值。因此梳状导频不适合用

于频率变化较大的信道，而可以用于时域的快速衰落信道。

1.3 叠加导频

如前文所述，块状导频与梳状导频只在时域或频域插值估计信道，且都存在不适用的情形，有较大的局限性。本文的研究提出基于叠加导频策略。叠加导频可以同时传输信息信号与导频信号，以适用不同的信道类型；另一方面，调节信息信号与导频信号的功率比，可以达到通信系统的最佳性能。

利用叠加导频，每个子载波 k 的传输信号可以表示为：

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{S}_c(k)\mathbf{U} + \mathbf{P}_c(k)\mathbf{V} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_c(k) &\in / \mathbf{C}^{P \times (I-R)}, \mathbf{U} \in / \mathbf{C}^{(I-R) \times I}, \\ \mathbf{V} &\in / \mathbf{C}^{R \times I}, \mathbf{P}_c(k) \in / \mathbf{C}^{P \times R} (P \leq R) \end{aligned} \quad (6)$$

其中： $\mathbf{S}_c(k)$ 为是被叠加导频和正交空时分组码 (orthogonal space-time block code (OSTBC)) 预编码的信息符号矩阵， \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 是叠加的预编码矩阵， $\mathbf{P}_c(k)$ 为导频符号矩阵^[16]。

叠加的预编码矩阵 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 是由一个任意酉矩阵得到的：

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}, \mathbf{O}\mathbf{O}^H = \mathbf{I}_I \quad (7)$$

由酉矩阵的性质， $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I}_{(I-R)}$ ， $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}_R$ ， $\mathbf{U}\mathbf{V}^H = \mathbf{0}_{(I-R) \times R}$ 。

使用 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 对信息符号和导频序列进行线性预编码可以使它们彼此正交。因此， \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 可用于：在估计信道响应时去除信息符号、在检测信息符号时用于零导频。

文献 [17] 中给出了正交空时分组码 (OSTBC) 预编码的信息符号矩阵，即：

$$\mathbf{S}_c(k) = \mathbf{A}(\text{Re}(\mathbf{S}(k)) \otimes \mathbf{I}_{N_c}) + j\mathbf{B}(\text{Im}(\mathbf{S}(k)) \otimes \mathbf{I}_{N_c}) \quad (8)$$

其中： \otimes 表示克罗内克积， N_c 为 OSTBC 码字的长度， $\mathbf{S}(k)$ 为信息符号矩阵，由 B 个连续的 OSTBC 码字组成，若 N_s 为信息原始符号个数，则 $\mathbf{S}(k) \in \mathbf{C}^{N_s \times B}$ ， $\mathbf{B} = \mathbf{I} - \mathbf{R} / N_c$ 。 $\mathbf{S}(k)$ 的元素是均值为零方差为 σ_s^2 的随机变量。

1.4 系统整体模型

在通信感知一体化系统中，雷达系统负责收集信道信息，完成感知任务，而通信系统负责收发通信信息完成传统意义上的信息传递，两者集成于同一系统但独立运作，最终还需要相互分离。综合 OFDM 与叠加导频的特性，我们得到一个整体模型：

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{S}_c(k)\mathbf{U} + \mathbf{P}_c(k)\mathbf{V} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{H}_c(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (10)$$

其中： $\mathbf{X}(k)$ 为叠加导频的信息矩阵， $\mathbf{Y}(k)$ 为接收机接受的信息符号矩阵， $\mathbf{H}_c(k)$ 为相应的信道频率响应，即 $\mathbf{H}_c(k) = \mathbf{H}(\mathbf{h}(k) \otimes \mathbf{I}_p)$ ， $\mathbf{W}(k)$ 为噪声的总和构成的矩阵^[18]。

根据酉矩阵的性质我们可以分离导频信号与信息信号：

$$\mathbf{Y}_c = \mathbf{Y}(\mathbf{I}_k \otimes \mathbf{V}^H) = \mathbf{H}\mathbf{P} + \mathbf{W}(\mathbf{I}_k \otimes \mathbf{V}^H) \quad (11)$$

其中： $\mathbf{P} = [(\mathbf{h}(0) \otimes \mathbf{I}_p) \mathbf{P}_c(0), (\mathbf{h}(1) \otimes \mathbf{I}_p) \mathbf{P}_c(1), \dots, (\mathbf{h}(k-1) \otimes \mathbf{I}_p) \mathbf{P}_c(k-1)]$ ，为导频矩阵。同理对于信息信号：

$$Y_s = Y(I_k \otimes U^H) = HS + W(I_k \otimes U^H) \quad (12)$$

其中： $S = [(h(0) \otimes I_p) S_c(0), (h(1) \otimes I_p) S_c(1), \dots, (h(k-1) \otimes I_p) S_c(k-1)]$ 为信息符号矩阵。由此，基于叠加导频的信息信号与导频信号融合发送，在接收端通过分离导频与信息信号，分别获得信道信息与通信信息，完成雷达与通信一体化研究。

2 实验验证

2.1 叠加导频在通信系统的仿真

2.1.1 OFDM 的调制与解调

OFDM 调制与解调需要首先对信息进行编码，得到二进制数据，再将二进制数据转换为 BPSK 符号，根据 OFDM 原理进行 IFFT 得到时域信号，添加 CP 后进入传输信道；解调则为其逆过程。具体流程如图 1 所示。

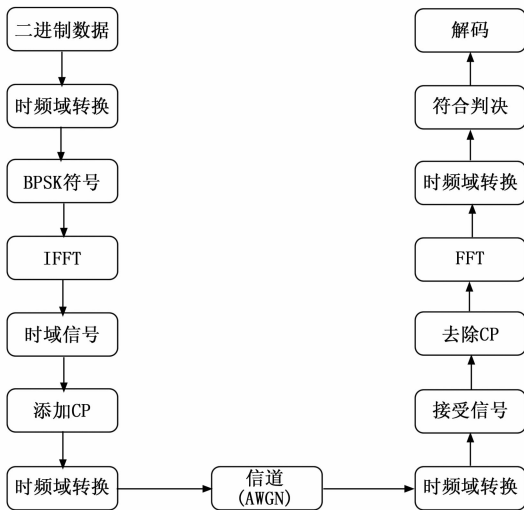


图 1 OFDM 调制与解调流程

在 Matlab 上完成 OFDM 调制与解调的仿真^[19]：

产生第一级的 1, -1 这种二值符号序列，并将符合排列在子载波上；把频域通过 FFT 变化到时域上，并添加 CP，得到 OFDM 符号，调制结果如图 2~3 所示。

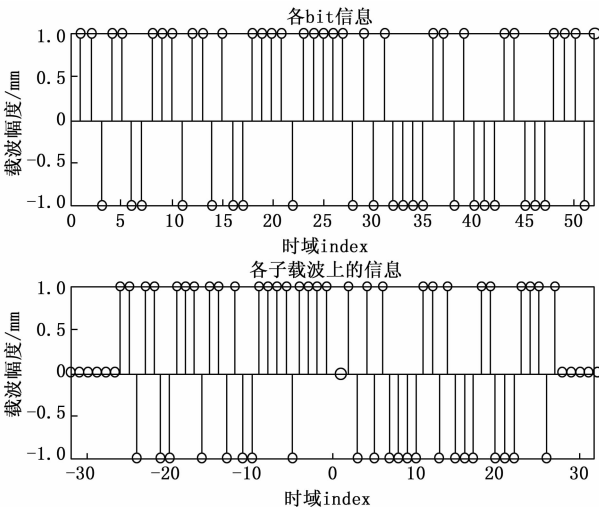


图 2 产生二值符号序列并在频域排列

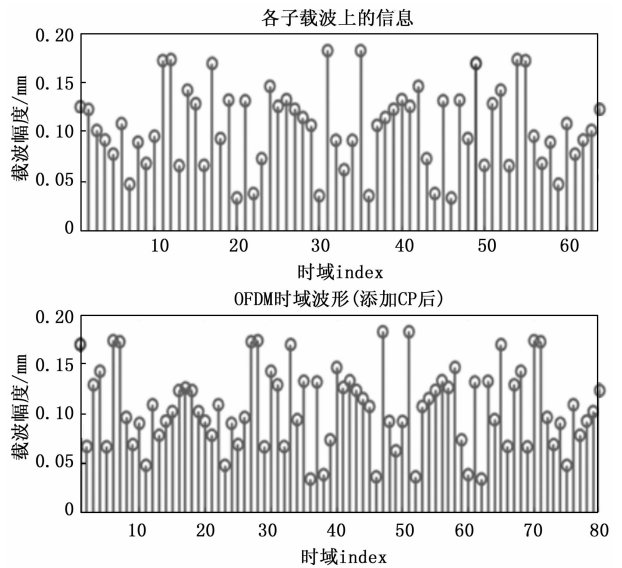


图 3 变换到时域并添加 CP

再经过流程图所示的方法解调后得到解调信号，该信号与原始信号一致，则本研究的 OFDM 调制无误。

2.1.2 导频策略

本研究在无噪声与有噪声环境下分别绘制块状导频、梳状导频与叠加导频的误码率曲线，以验证叠加导频相较于传统导频策略的优越性。

2.1.2.1 无噪声环境的仿真

1) 块状导频：

根据块状导频特性，周期性地更新响应矩阵，Matlab 代码如下：

```

n=10;% n 为实验次数
N=100;% N 为更新间隔
for count = 1: n
    rng(101)%起始时信道频率响应
    ChannelFreqResponse1 = 1 + randn(TotalNumberOfSubCarrier,1);
    ChannelFreqResponse1 = smooth(ChannelFreqResponse1,1);
    rng(102)%结束时信道频率响应
    ChannelFreqResponse2 = 1 + randn(TotalNumberOfSubCarrier,1);
    ChannelFreqResponse2 = smooth(ChannelFreqResponse2,1);
    ChannelFreqResponse = (1 - count/n) * ChannelFreqResponse1 + (count/n) * ChannelFreqResponse2;
end

```

选取每隔 31、127、511 个信息信号插入一个导频信号以更新信道，获得的误码率曲线分别如图 4 所示，其中纵坐标为误码率，横坐标为信息信号的数量。

由图可知，一次信道更新后，随着时间的推移，信道在时域上不断变化，误码率从零不断上升，直到下一次插入导频更新信道，误码率归零，如此循环往复。这与前文的理论研究是一致的，块状导频不适于时域变化较大的信道。

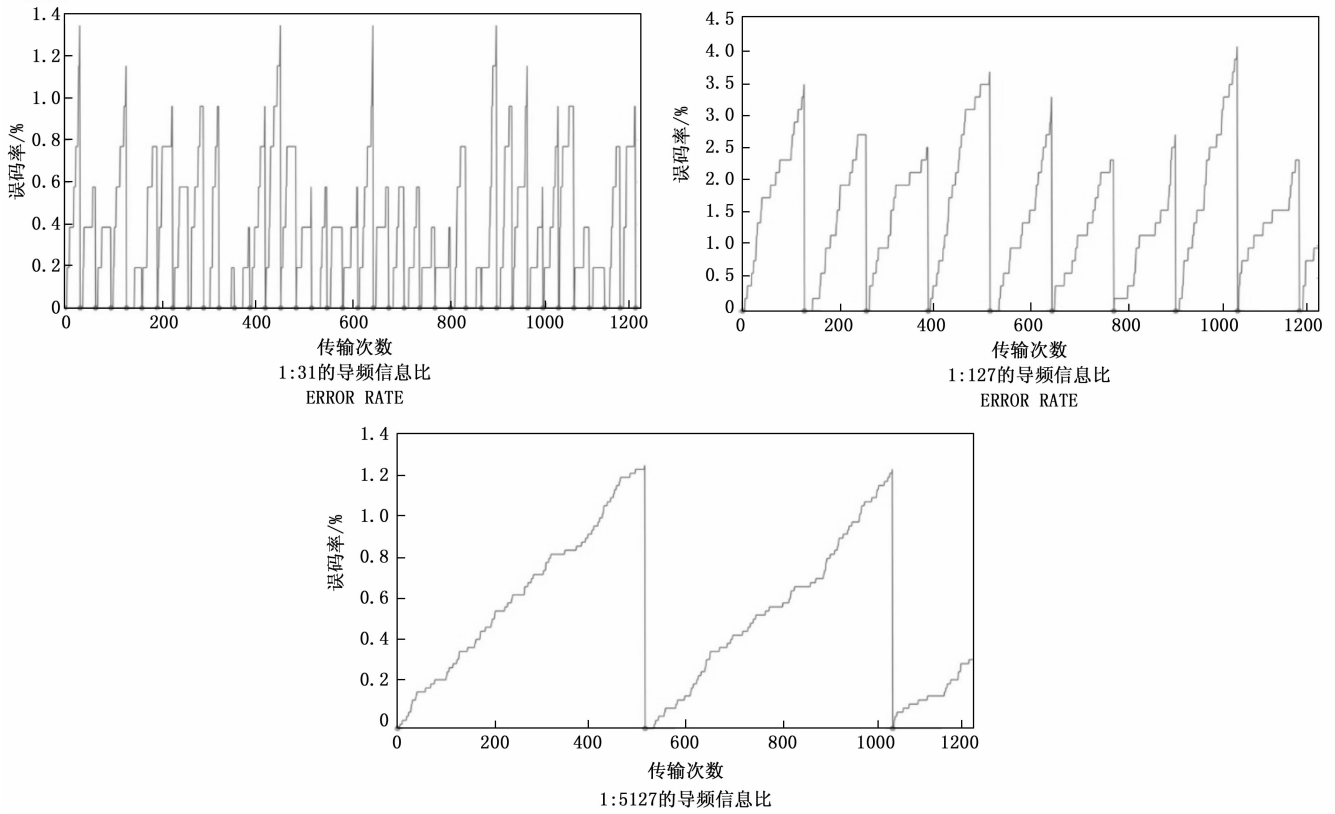


图 4 不同导频信息比的误码率曲线

2) 梳状导频:

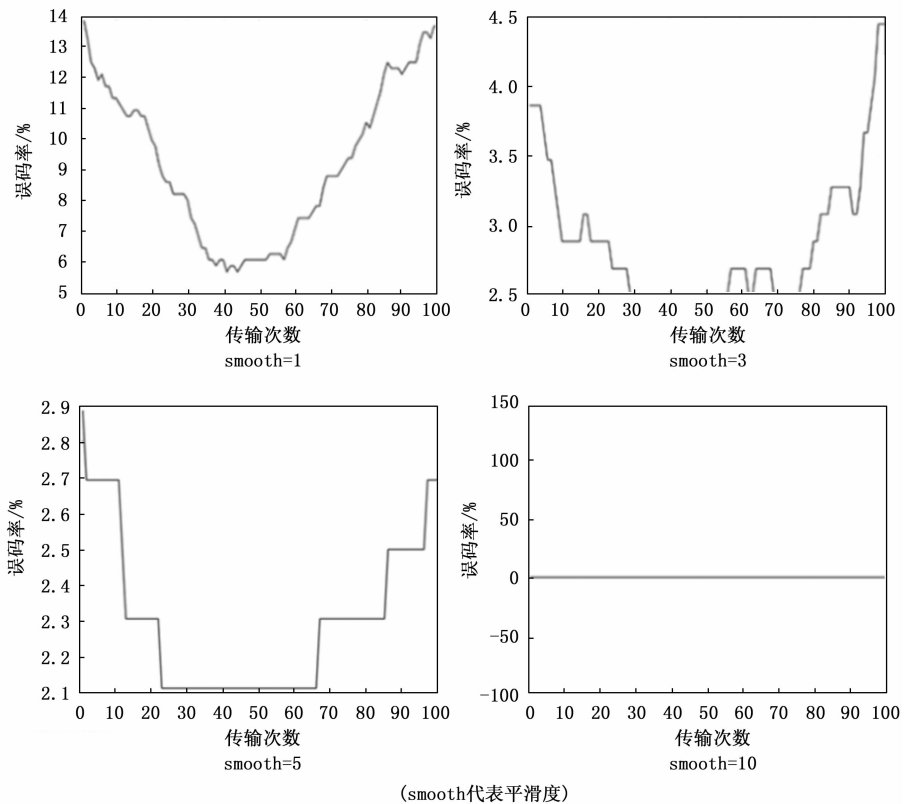
梳状导频要求信道响应频域上不能过于剧烈, 因此信道的时域变化越平滑, 误码率越低; 增大导频与信息信号的比例也可以改善误码率。我们用 smooth 函数刻画信道的平滑程度, 并且改变导频与信息信号的比例。Matlab 代码如下:

```

rng(101)%起始时信道频率响应
ChannelFreqResponse1_1 = randn(sym
_number * (TotalNumberOfSubCarrier),1);
ChannelFreqResponse1_1 = smooth
(ChannelFreqResponse1_1,10);
ChannelFreqResponse1_1 = 1 + Chan-
nelFreqResponse1_1;
rng(102)%结束时信道频率响应
ChannelFreqResponse2_1 = randn(sym
_number * (TotalNumberOfSubCarrier),1);
ChannelFreqResponse2_1 = smooth
(ChannelFreqResponse2_1,10);
ChannelFreqResponse2_1 = 1 + Chan-
nelFreqResponse2_1;

```

固定导频、信息信号比例 1 : 2, 分别选取 smooth 为 1、3、5、10, 得出结果如图 5 所示。



(smooth代表平滑度)

图 5 不同平滑度的梳状导频仿真

可见信道频域上越平滑，梳状导频的误码率越低；反之，则梳状导频的误码率显著上升。这与前文所述梳状导频的性质一致。

3) 叠加导频：

利用叠加导频的系统生成误码率曲线如图 6 所示。

系统误码率为零，则说明在无噪情况下叠加导频优于传统导频策略，极大降低了误码率。

2.1.2.2 有噪环境的仿真

1) 块状导频：

分别令 $SNR=5, 10, 15, 20$ dB，更新间隔分别为 $1:127, 1:511$ ，仿真结果如图 7 所示，其中每个结果图纵坐标为误码率。

引入噪声因素后，在小信噪比时，噪声是引起误码的主要因素，信道更新对误码率曲线没有显著影响；当信噪比增大到一定数值时，块状导频的不适于时域变化较大的信道的性质是造成误码的主要原因，更新信道可以显著降低误码率。

2) 梳状导频：

在有噪声的情况下仿真，我们使一个随机的信道慢慢变化到另一个随机的信道，用误码率刻画信息传输的准确度。分别令 $SNR=5, 10, 15, 20$ dB，误码率曲线如图 8 和图 9 所示。

表明在信道缓慢变化时，噪声是引起误码的主要原因。

3) 叠加导频：

与无噪仿真类似，在有噪环境中利用叠加导频的系统获得误码率曲线，取 SNR 分别为 5、10、15、20 dB。

可见梳状导频、块状导频在有噪声的情况下性能都出现了下降。叠加导频的性能也出现了下降，但是当叠加导频的导频和信号功率比合适时，噪声的影响其实就没那么重要了。

2.1.3 导频部分小结

如原理部分所述，块状导频与梳状导频对于时域或频域起伏较大的信道都存在显著缺陷造成误码，而叠加导频则在各种变化的信道中展现了出色的性质。噪声会削弱传统导频的性能，但是叠加导频的导频与信号功率比合适时，噪声的影响就可以消除。

2.2 叠加导频在雷达系统中的仿真

本研究模拟了一个一维场地的信道响应。我们对通信信号进行频域相乘。对雷达信号进行时域上的卷积，用包头

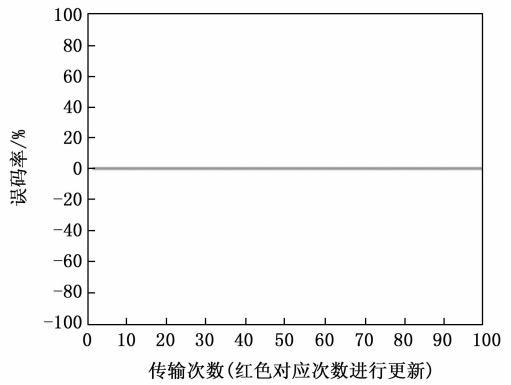


图 6 叠加导频

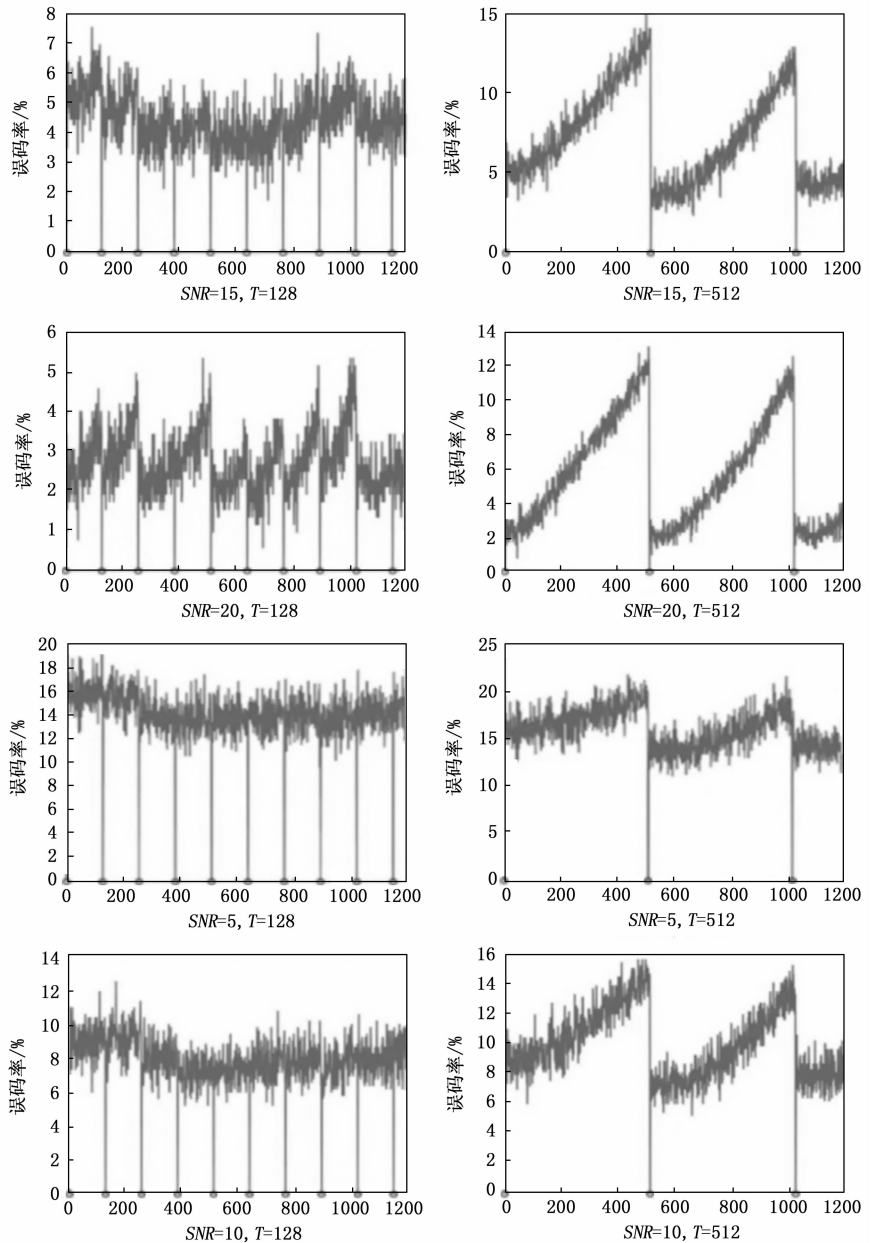


图 7 有噪环境的块状导频仿真

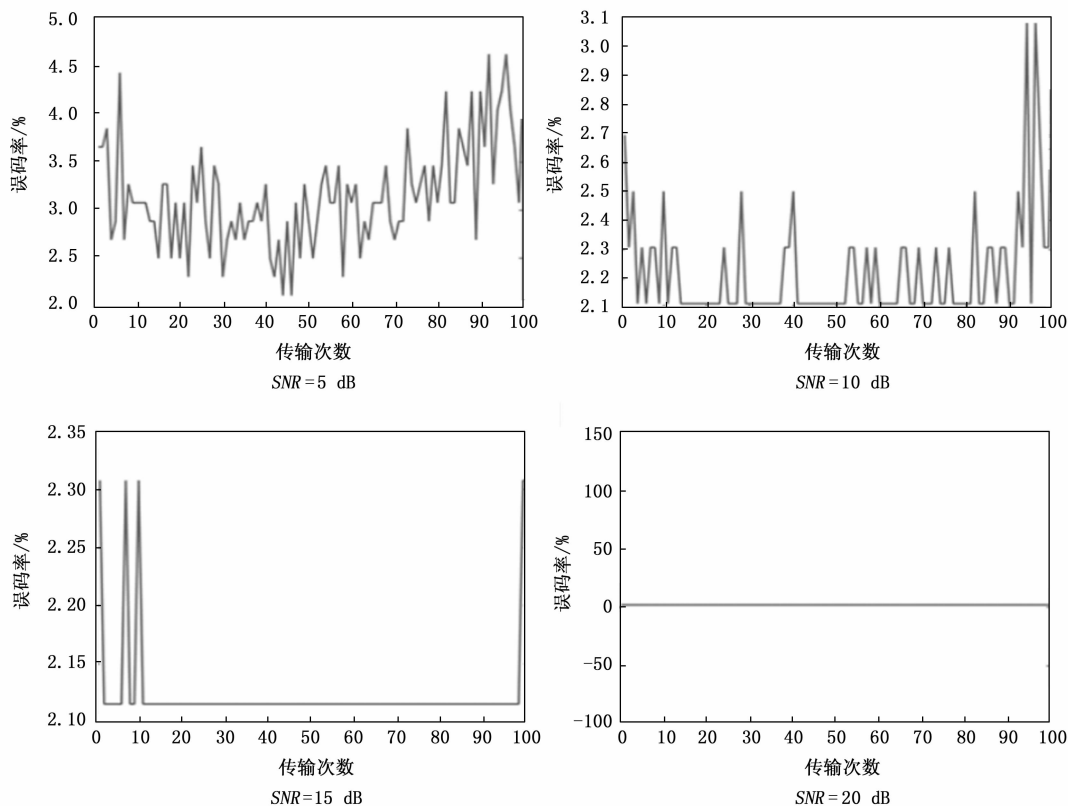


图 8 有噪声环境梳状导频仿真

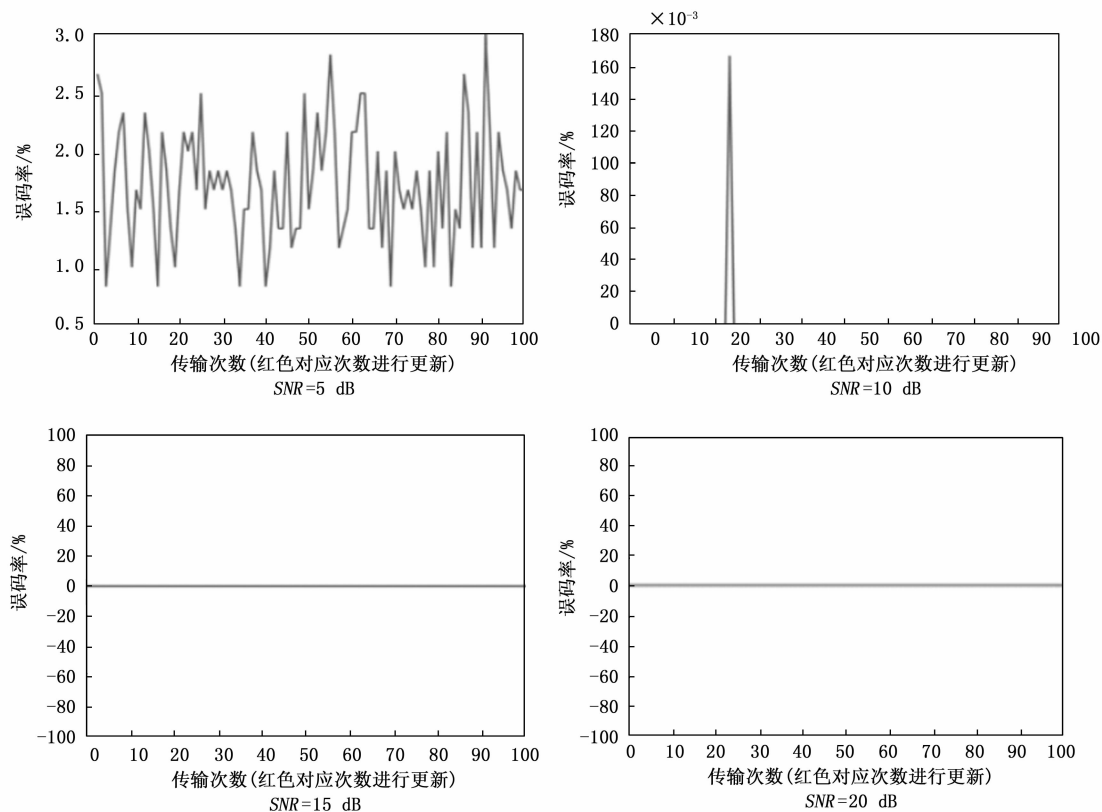


图 9 有噪声环境下叠加导频的仿真

延迟线模型模拟了场地中不同大小物体对电磁波的反射造成的多径效应（假设二次反射的信号很微弱，不考虑二次反射）。

系统参数如表 1 所示。雷达系统工作流程如图 10 所示。

表 1 系统参数

系统带宽	50 MHz
调制格式	OFDM 和叠加导频
通信系统的谱效率和信息速率	0.625 bit/Hz 3.125 × 10 ⁷ bit
雷达系统的谱效率和信息速率	2 bit/Hz 1 × 10 ⁸ bit
雷达系统的工作距离	240 m
雷达系统的时延	0.1 ms
雷达系统的刷新率	0.1 ms

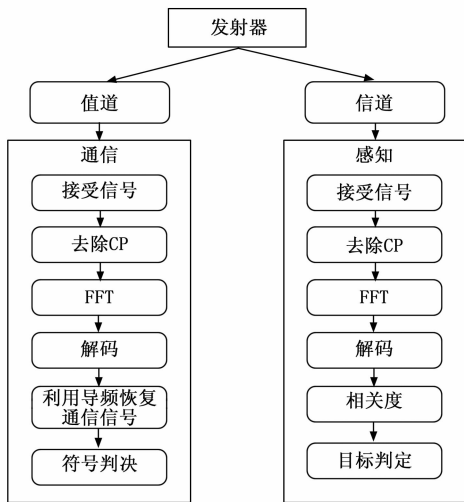


图 10 通信雷达一体化系统工作流程图

2.2.1 雷达系统对于单点目标的响应

传统雷达使用匹配滤波的方法使用 OFDM 信号完成雷达探测^[20]。本研究使用计算相关度代替提高信噪比^[21]。可以证明，相关度的本质就是匹配滤波：

相关度的计算方法是：

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) f_2(t + \tau) dt \quad (13)$$

而卷积公式为：

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (14)$$

匹配滤波的原理为，接收机的传递函数恰等于输入端信号的复共轭：

$$H(\omega) = S^*(\omega) \quad (15)$$

$$G(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega) = S(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (16)$$

其中： $s(t) \xrightarrow{F} S(\omega)$ 为输入信号的时频域表示， $g(t) \xrightarrow{F} G(\omega)$ 为输出信号的时频域表示。注意到频域上的复频域即是时域上的时间反转，故输入信号 s 的相关度可

写成：

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s(\tau - t) dt \quad (17)$$

与 s 和 h 的卷积形式一致，因此相关度的计算本质上就是匹配滤波。

通过匹配滤波，我们提高了信噪比（噪声相互抵消）。

输出信噪比可以表示为：

$$SNR_o = \frac{s_o^2(t)}{n_o^2(t)} \quad (18)$$

在频域上得到输出信号表达式：

$$s_o = F^{-1}[S(j\omega) \cdot H(j\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega) H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (19)$$

白噪声表达式为：

$$\overline{n_o^2(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} N |H(j\omega)|^2 d\omega \quad (20)$$

由 Cauchy-Schwarz 不等式：

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega) H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \right|^2 \leq \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega \right) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega \right) \quad (21)$$

当且仅当：

$$H(j\omega) = k[S(j\omega) e^{j\omega t}]^* \quad (22)$$

等号成立，即信噪比取到最大值。因此匹配滤波可以有效提高输出信噪比。

对于单点目标，仿真结果如图 11 所示，其中从上至下 3 幅图分别为相关度、接受信号与模拟场地。

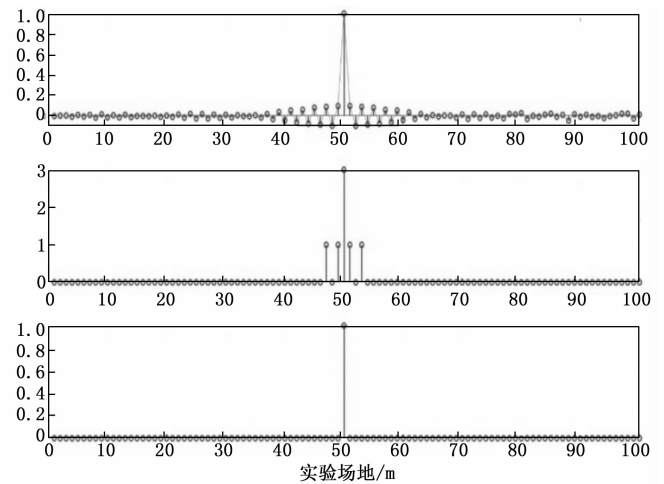


图 11 单点目标的仿真

相关度曲线上存在明显的峰，说明探测到了相关目标。

2.2.3 雷达信号对于单点目标的串扰

由图 11 可见，经相关度运算后并非理想的单峰，这说明雷达信号也存在类似于通信系统中的码间串扰的旁瓣响应问题。为解决这一问题，本研究尝试了加窗与匹配滤波法。

首先使用加窗法，在响应信号上加窗。加窗法的结果

图中由上至下分别为相关度、接受信号与模拟场地：

如图 12 所示，可以看到上述问题依然存在，加窗虽然可以减少码间干扰的范围，增加旁瓣抑制比，但是让主瓣高度降低，归一化之后表现为主瓣宽度变宽。并没有让通信的结果变得更好。再尝试匹配滤波法，可以将主瓣压窄。在匹配滤波法的结果图中，由上至下分别对应相关度、接受信号与模拟场地。

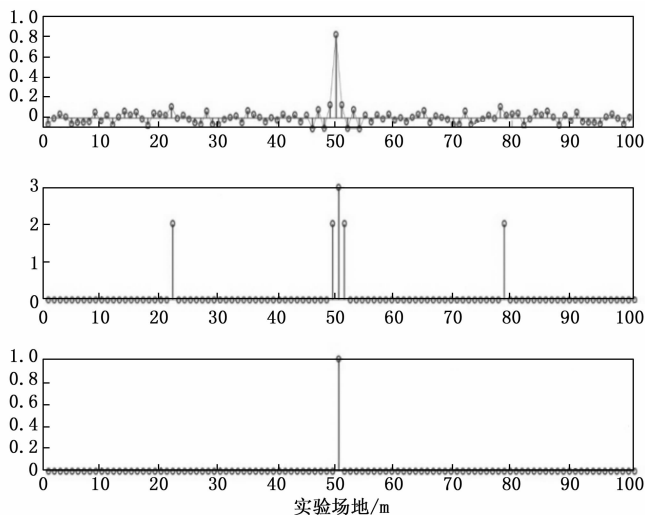


图 12 加窗法

如图 13，可见匹配滤波法明显压窄了主瓣，有效缓解了类似通信系统的码间串扰与旁瓣响应问题。

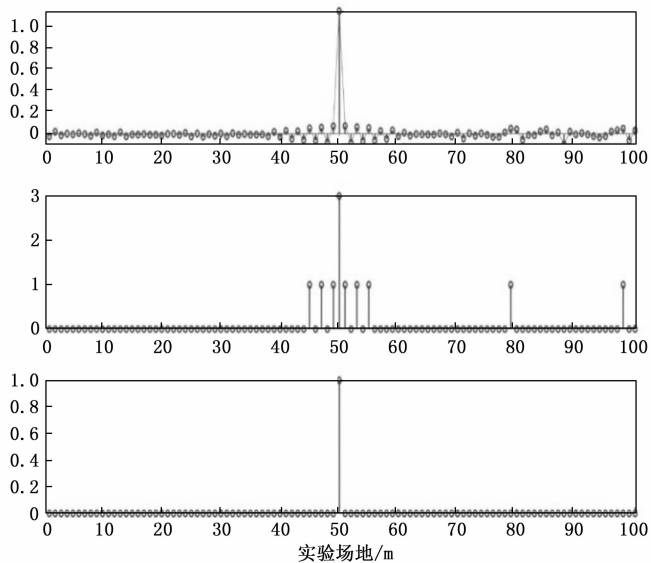


图 13 匹配滤波法

3.2.3 雷达系统对于多目标的响应

用同样的研究方法在多目标场地进行仿真，互相关曲线结果如图 14 所示，图中，由上至下分别对应相关度、接受信号与模拟场地：

其误码率为零，仿真结果是准确无误的。这表明基于

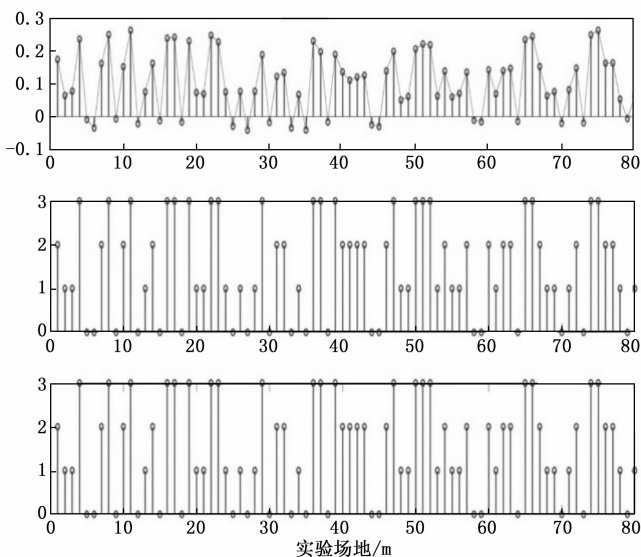


图 14 雷达系统对多目标的响应

导频的雷达系统性能优秀，可以完成单点与多个目标的探测。

2.3 信道的传输上限

2.3.1 信道的理论传输上限

用香农定理计算融合信道的理论传输上限：

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (23)$$

$$SNR = 10 \lg \frac{S}{N} \quad (24)$$

在仿真中，我们设置 SNR 为 10 dB，可求出信道传输上限约为 3.5 bit/Hz。

2.3.2 实际信息传输速率

改变通信和感知信道的功率比，计算两路实际上传输的速率（用互信息衡量）和信道传输的理论上限的差值。并且绘制两路的误码率，以及系统总的误码率，结果如图 15 所示。

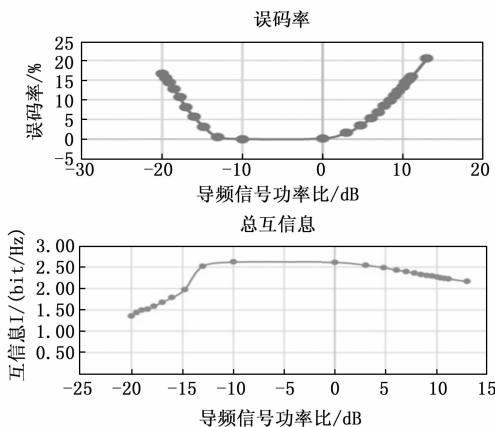


图 15 误码率与总互信息仿真

由图 15 可知，随着导频信号功率比上升，对信道的感知能力以及通信的传递的信息量都逐渐增加，总互信息上

升；当导频与信号的功率比较合适时，可以实现通信和感知的无错误传输；随着导频信号功率比进一步增加，雷达响应的互信息不再增加，但由于导频信号不携带信息，通信模块携带的信息量减少，互信息下降，因此总互信息下降。

3 结束语

通信系统方面，仿真结果与理论分析一致，块状在时间维度上是过时的，如果不及时更新信道响应，误码率会随时间增大而不断增大；梳状导频是即时的，然而梳状导频在频域上是插值的，不能处理一个频率选择性很强的信道。同时验证了叠加导频的优越性，可以解决时域和频域上的问题，并且叠加导频的抗噪声能力更强。

雷达系统方面，雷达系统完成了对单点目标和多个目标的探测，并降低了类似通信系统的码间串扰与旁瓣响应等负面影响。

综合通信系统与雷达系统，本研究完成了基于叠加导频的雷达与通信一体化信号处理算法的研究。

本研究还有一些未竟之处。在雷达部分，传统雷达使用匹配滤波器成像，将雷达的回波信号与匹配滤波器卷积运算，从而提高信噪比，实现目标的检测与跟踪。在未来的研究中，可以结合本文的研究结果，利用叠加导频的性质，分离出信息信号，再做相关运算，进一步结合 SAR 算法，从而达到雷达二维成像的效果。在雷达通信一体化系统部分，实际的传输速率还没有达到理论上限，其具体原因有待进一步研究，可以在未来的中确定方向，并进一步提高效率。

参考文献：

- [1] 姜大洁, 姚健, 李健之, 等. 通信感知一体化关键技术与挑战 [J]. 移动通信, 2022, 46 (5): 69-77.
- [2] XIA X, ZHANG T, KONG L. MIMO OFDM radar IRLCI free range reconstruction with sufficient cyclic prefix [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51 (3): 2276-2293.
- [3] 刘燕, 万显荣, 易建新. 基于数据失真的雷达通信一体化 OFDM 波形设计方法 [J]. 雷达学报, 2024, 13 (1): 160-173.
- [4] NAYEBI E, RAO B D. Semi-blind channel estimation for multiuser massive MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66 (2): 540-553.
- [5] LIU Y, LIAO G, YANG Z, et al. Design of integrated radar and communication system based on MIMO-OFDM waveform [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28 (4): 669-680.
- [6] LI B, PETROPULU A P. Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing ra-

- dars in clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53 (6): 2846-2864.
- [7] HUANG Z, HUANG C, TANG B, et al. Waveform design for dual-function radar communications based on the MIMO platform [C] //2021 CIE International Conference on Radar (Radar), Haikou, 2021: 2871-2875.
- [8] HAN L, WU K. 24-GHz joint radar and radio system capable of time-agile wireless sensing and communication [C] //2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, MD, USA, 2011: 1-4.
- [9] 夏文超, 徐婧, 周星光, 等. 面向工业物联网场景下行短包传输的叠加导频功率优化 [J/OL]. 物联网学报: 1-11 [2024-02-16].
- [10] 田团伟. 雷达通信一体化的多载波信号功率分配算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [11] ALDANA C H, DE CARVALHO E, CIOFFI J M. Channel estimation for multicarrier multiple input single output systems using the EM algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51 (12): 3280-3292.
- [12] TIGREK R F, DE HEIJ W J A, VAN GENDEREN P. OFDM signals as the radar waveform to solve Doppler ambiguity [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48 (1): 130-143.
- [13] CHO Y S, KIM J, YANG W Y, et al. MIMO-OFDM 无线通信技术及 Matlab 实现 [M]. 孙锴, 黄威, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [14] BAO D, QIN G, CAI C, et al. A Precoding OFDM MIMO radar coexisting with a communication system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55 (4): 1864-1877.
- [15] LARSSON E G, STOICA P. Space-time block coding for wireless communications [M]. Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
- [16] TRAN N N, TUAN H D, NGUYEN H H. Superimposed training designs for spatially correlated MIMO-OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9 (3): 876-880.
- [17] OGALE A, CHAOU DHARY S, PATIL A J. Performance evaluation of MIMO-OFDM system using matlab? simulink with real time image input [C] // 2013 Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), Bhopal, India, 2013: 1-5.
- [18] BERGER C R, DEMISSIE B, HECKENBACH J P, et al. Signal processing for passive radar using OFDM waveforms. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4 (1): 226-238.
- [19] 陈文娟. 雷达通信一体化系统信号的设计和参数估计的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.