

基于 OFDM 波形的短波通信与超视距雷达集成实验研究

邵启红^① 万显荣^{*①} 张德磊^② 赵志欣^① 柯亨玉^①

^①(武汉大学电子信息学院电波传播实验室 武汉 430072)

^②(中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210007)

摘要: 该文利用武汉大学新近研制的全数字主被动一体化高频地波雷达硬件平台,开展了短波通信与雷达探测的一体化实验研究。结合高频电波特定传播环境,首先从通信角度介绍了正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)在短波通信中的关键技术,然后从雷达探测角度分析了 OFDM 参数设计准则及其对超视距雷达探测性能的影响,最后说明了通信信号解调与探测信息获取的处理流程及部分关键技术,并介绍了硬件平台、参数配置及实验结果。结果表明 OFDM 波形是一种良好的雷达通信一体化信号,该技术对超视距雷达(Over-The-Horizon Radar, OTHR)组网探测研究具有重要意义。

关键词: 雷达通信一体化; 正交频分复用; 短波通信; 超视距雷达

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)04-0370-10

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20089

Experimental Study on Shortwave Communication and OTHR Integrated System Based on OFDM Waveform

Shao Qi-hong^① Wan Xian-rong^① Zhang De-lei^② Zhao Zhi-xin^① Ke Heng-yu^①

^①(Radio Propagation Laboratory, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

^②(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: Based on the recently developed active-passive multifunctional all-digital HF surface wave radar hardware platform of Wuhan University, an experiment study of integrated technology for shortwave communication and Over-The-Horizon Radar (OTHR) application is carried out. Firstly, from the point of communication are demonstrated the key technologies of orthogonal frequency division multiplexing (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) in the short-wave communication. Secondly, from the point of radar detection are analyzed OFDM parameters design guidelines and its impact on the over-the-horizon radar detection performance. After the description of some key technologies related to communication signal demodulation and radar signal processing, the configuration parameters of hardware platform and experimental results are provided. The results show that the OFDM wave is done well in radar-communication integration systems, which is of great significance on the netted OTHR detection research.

Key words: Radar-communication integration; Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Shortwave communication; Over-The-Horizon Radar (OTHR)

1 引言

长期以来通信领域和雷达领域由于受各自研究对象的不同而被严格地区分,以短波(3~30 MHz, 又称高频、HF)为例,因其独有的电离层折射传播和沿导电海洋表面绕射传播特性,高频电磁波在通

信领域和雷达领域都有着广泛应用。就通信而言,它可以实现数千甚至上万公里的远距离通信,也可进行几十到数百公里的中近距离通信,既可用于舰载、机载、车载、个人背负等移动通信,也可用于大型固定台站通信,使用机动灵活、设备简单、造价低廉。就雷达而言,可分别构建天波雷达、地波雷达和天地波混合雷达,3类雷达均具有作用距离远、超视距、反隐身等突出优点,是主权国家用于战略预警、国土防空、海洋权益维护的重要装备,此外该雷达还可作为远程大面积海洋表面动力学参

2012-11-30 收到, 2012-12-12 改回; 2012-12-17 网络优先出版
国家自然科学基金资助项目(60971101, 41074116, 41106156)和中央
高校基本科研业务费专项资金(2012212020214)资助课题

*通信作者: 万显荣 xrwan@whu.edu.cn

数(风、浪、流)监测和大区域电离层环境遥感的有力手段^[1-3]。

国内外已经有不少的学者研究了雷达与通信的一体化设计方案。按照发射机、接收天线、接收机等硬件是否共享等条件,将一体化的方式进行了分类并分析了各种方式的特点和适用条件^[4-6]。其中,关于信号共享,信号波形的设计及其应用的研究也成为当前的热点问题^[7-10]。

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术是一种在通信系统中广受关注的多载波数字调制方式,具有较高的频谱利用率、较强的抗衰落和抗干扰能力等优点。随着雷达技术的发展,OFDM 的概念也被引入到雷达应用中,并逐渐成为新兴的雷达信号形式^[11-13]。

本文针对超视距雷达组网探测的需求,提出了一种基于 OFDM 波形的短波通信与超视距雷达探测一体化工作模式,研究了其实现所涉及的关键技术,介绍了利用武汉大学新近研制的全数字主被动一体化高频地波雷达硬件平台实现信息传输和雷达探测功能的实验结果。

2 OFDM 基本原理及参数设计

OFDM 是一种特殊的多载波传输方案,既可以看作是一种调制技术,也可以被当作一种复用技术,其主要思想是:利用多个正交子信道分担传输任务,即将原始的串行数据流经串/并转换后映射到多个相互正交的子载波上进行调制,然后对各子载波求和后实现传输。在接收端则通过相逆的过程,利用各子载波的正交关系分离出传输数据。

OFDM 时域基带信号可以简单表示为

$$s(t) = \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} d_k \exp\left(j2\pi \frac{k}{T_s} t\right), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (1)$$

其中: K_{\min} 为最小子载波序号; K_{\max} 为最大子载波序号; k 为子载波序号; T_s 为 OFDM 符号持续时间; d_k 为第 k 个子载波上的调制数据。由上式看出,OFDM 信号不同的子载波之间在频域上保持了 $1/T_s$ 均匀间隔,如图 1 所示,在每个子载波频谱的最大值处,其他所有子载波的频谱恰好为零点,因此若在各载波频谱最大值点进行抽样,子载波间将不存在相互干扰。

基于 OFDM 系统子载波频域的正交性,利用 FFT 快速算法可高效地实现 OFDM 信号的调制解调,随着数字信号处理和超大规模集成电路技术的逐渐成熟,高速多层次 QAM 调制技术、网格编码技术、软判决技术、信道自适应技术、保护间隔技术、信道均衡快速计算等技术逐步引入到无线通信

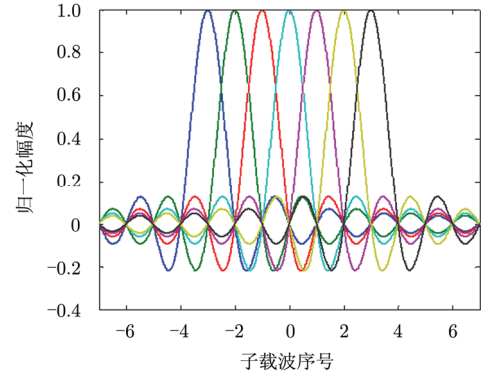


图 1 OFDM 信号频谱

领域,使得诸如复杂计算、高速存储器等妨碍 OFDM 实现的问题得到彻底解决。随着无线语音、视频、宽带接入、无线局域网、多媒体业务等无线通信业务的发展,OFDM 技术得到了广泛应用。

3 OFDM 短波通信的关键支撑技术

短波信道是一种时变色散的信道,存在多径时延、衰落、多普勒频移、天电干扰和电台干扰等一系列复杂现象。OFDM 系统需要根据信道特性来设计参数,不同的传播模式、多径数量与强度、多普勒频偏、多普勒扩展等信道特性决定了系统参数的选取。需要考虑的参数有信号带宽、数据比特速率、信道多径扩散时延、符号长度、保护间隔(Guard Interval, GI)长度、数据帧个数、子载波数目、导频数量和能量、符号周期等。

3.1 循环前缀技术

短波通信中的多径现象几乎不可避免,多径现象产生的原因大致有:天波与地波同时传播、电离层多跳、电离层不同层反射、宽波束或者不同仰角发射、地磁场把信号分成两个磁离子模式分量(即 O 模式和 X 模式)、电离层不均匀体呈现的多个散射体^[1]。多径的存在,将会导致前一个符号的结束部分与后一个符号开头部分重叠,产生符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)导致频率选择性衰落,使信号质量下降。相对于其他多载波通信系统,OFDM 系统在频率选择性信道具有一定的优势,由于数据被调制到多个子载波信道进行传输,每个子信道的数据速率降低,相应的多径扩散容限将提高,但是对于天波传播路径的大时延来说,仍然会产生 ISI 从而破坏子载波之间的正交性。

为了对抗多径效应导致的 ISI,添加循环前缀(Cyclic Prefix, CP)被证明是十分有效的方法,此时,OFDM 符号的结构可用图 2 表示,其中 T_g 为保护间隔长度, T_u 为有效部分长度,符号长度变为 $T_s =$

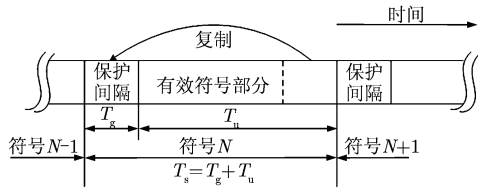


图 2 完整 OFDM 符号结构示意图

$T_g + T_u$ 。循环前缀长度要求大于多径扩展时延，即 $T_g \geq \tau_{max}$ ，且长度越长，系统抗干扰的能力也就越强。但因其属于辅助结构，不携带有用信息，故 T_g 的增大会导致信号能量与信息速率的损失。

根据通信环境不同的传播时延，通过调整 CP 与符号长度比值 $GR = T_g / T_s$ 来设计循环前缀参数，实验表明，当 $T_g / T_s \leq 0.25$ 时，可使得子信道满足平衰落的要求^[14]。本实验参考短波信道的特点设计了如下几种鲁棒模式以适应不同的传播环境。

表 1 OFDM 信号的不同模式

模式	应用环境	循环前缀 CP 与符号长度比值 GR
1	高斯信道	1/9
2	长时延，小多普勒扩展	1/4
3	长时延，大多普勒扩展	4/10
4	超长时延，严重多普勒扩展	11/14

3.2 离散导频技术

在实际的短波通信环境中，信道的时域和频域响应是多变的。对于 OFDM 多载波传输系统而言，多径干扰引起的频率选择性衰落在不同的子载波上表现将会不一样，从而导致 OFDM 符号在各个子载波上出现的畸变不均匀。为了实现有效稳定的通信，OFDM 系统常在信号帧结构中添加固定的参考单元(导频)，为接收端解调提供必要的辅助。导频的数量、能量、插入方式与信道的最大多径扩展时延、最大多普勒频移等传播信道环境有关。根据功能的不同，又将其导频分为时间导频、频率导频和增益导频。时间导频是为了收发两端数据帧头的确认，一般位于帧内首符号；频率导频是用作估计收发两端的载波频率偏差，一般占用所有符号中固定的频率位置；增益导频是为实现对信道响应的实时跟踪与均衡，图案在时频方向上具有相等的扩展，增益导频插入方式常见的有梅花状导频和梳状导频。在参考了短波段相关标准^[15]之后，本次实验采用了梅花状增益导频方案。3 种导频(参考单元)位置分布如图 3，能量分布如图 4。

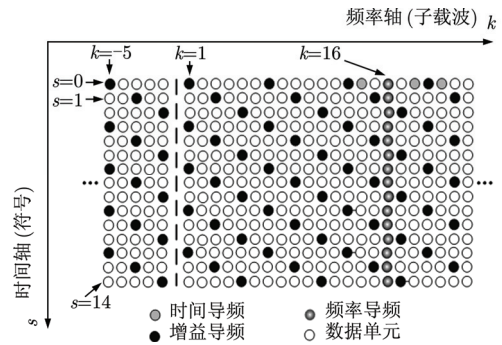


图 3 导频在 OFDM 中的分布

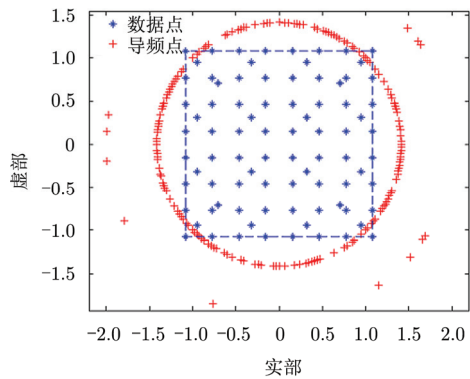


图 4 导频在复平面的能量分布

3.3 峰均功率比抑制技术

用于短波通信的 OFDM 信号为连续波，是由多个独立的载波信号时域叠加而成，当各载波信号相位相同或相近时，叠加后在时域某些地方会出现很大的峰值，由此会带来很高的峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)。峰均功率比过高会造成信号的非线性失真，产生谐波，造成较明显的频谱扩展，导致系统性能下降。OFDM 信号的高 PAPR 对接收机和发射机的线性特性和动态范围都提出了很高的要求。

在如何降低 OFDM 信号的 PAPR 问题上，国内外学者提出了很多种解决方法，大概可以分为预畸变技术、编码类技术和概率类技术。预畸变技术是指信号在经过放大器之前预先对其中幅值较大的值进行非线性压缩处理，减小或消除信号经过放大器时产生非线性失真的概率，其本质就是对信号中超过规定门限的值进行非线性处理，这类技术主要有限幅法、峰值加窗或消除法、压缩扩张技术等；编码类技术是指选择 PAPR 较小的信号码字进行传输，减少传输 PAPR 较高的码字组合，它是一种线性的处理方法，不引入非线性失真和干扰，但一般会以一定的数据速率损失为代价且系统复杂度会增加，常用的编码方式有互补格雷码、雷德密勒码

和分组编码等；概率类技术的主要思想是利用不同序列来表示同一组需要传输的信息，从中选择 PAPR 最小的序列作为 OFDM 信号传输序列，该类方法也不会使信号产生非线性失真，其主要的方法有选择性映射法、部分传输序列法等^[16-18]。本实验中主要采用了限幅法和压缩扩张法。

3.4 同步技术

电离层中各种不均匀散射体的运动、反射层经常性的起伏变化、电离子密度变化等因素导致传播路径的长度不断地变化，信号的相位也随之产生变化，因而产生了短波信道的多普勒效应。这种相位的变化，导致信号解调中需要不断进行同步，OFDM 信号的同步根据功能可将其同步划分为时间同步、频率同步、样值同步和帧同步。时间同步是为了确定 OFDM 符号有效部分的起始时刻，即接收端 FFT 开窗的起始点；样值同步是为了纠正由于收发系统时钟频率偏差而导致的采样点偏移，由于本系统采用 GPS 模块提供的高稳时钟源，所以采样率偏差带来的影响很小，可以忽略；频率同步用于纠正由收发两端的本振频率偏差以及传输信道不稳定而引入的载波频率抖动，由于频偏会导致子载波之间的正交性遭到破坏，从而使得系统性能急剧下降，所以 OFDM 系统的频率同步非常重要；帧同步则是为了搜索每个传输帧的起始符号，以确定每帧的数据体头部。

3.5 信道编解码技术与信道均衡

为了更好地抵抗短波信道突发干扰，提高系统容错能力，还需在系统中引入信道编码技术，本实验系统采用伪随机二进制序列多项式进行能量扩散，使得原始数据随机化，采用可删余卷积码进行差错控制，采用了比特交织技术使系统能够更好地抵抗突发干扰。

解调过程需要估计出信道的时域或频域响应，然后通过信道均衡对接收到的数据进行校正与恢复，其算法的性能主要决定于信道的最大时延、噪声以及估计方法等。

信道编解码及信道估计对系统性能的改善具有很重要的影响，在上文表 1 中模式 2 所给信道条件下，采用 2 维 Wiener 滤波算法进行信道估计并均衡，然后统计加入信道编码模块前后解调误码率的变化，得到结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出，信道编码能大大提升系统性能，也使得接收端能在更恶劣的信道环境下提取出较低误码的发射信号，从而提高获得信号的准确度。

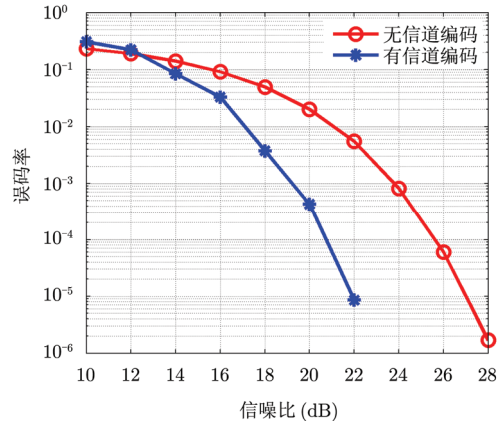


图 5 信道编码对误码率的影响

4 基于 OFDM 波形的超视距雷达探测技术

现有该频段雷达多数采用主动辐射信号的有源体制，发射信号形式包括：脉冲线性调频(相位编码)、线性调频连续波、线性调频中断连续波等。雷达与通信由于各自侧重点不同，在进行波形设计的时候需要综合考虑多参数以优化资源的配置。对于雷达通信一体化系统，OFDM信号的参数，比如带宽、循环前缀长度、导频数量与能量、符号的长度等参数都将影响到雷达系统的探测性能和处理方式，系统发射功率、载波频率、波束覆盖范围、以及是否采用单频网(Single Frequency Network, SFN)结构等特性将影响雷达的探测威力和组网性能。表2列出了集成系统需要综合考虑的参数资源。

表 2 雷达与通信集成系统参数资源

参数	通信应用	雷达应用
带宽	决定传输数据数量与质量	决定距离分辨率
载波频率	决定了信道特性和覆盖的范围	决定电波传播的路径和探测模式
离散导频数量	用于辅助解调，其数量和能量影响数据率	可导致检测副峰和恒虚警
天线方向图	根据通信要求，一般广播为全向、定向通信具有方向性	高增益天线方向图具有更高的探测距离
发射功率	决定了覆盖面积的大小和抗噪声性能	决定了探测距离和探测范围
单频网	小功率覆盖大的面积	产生严重的多径，给目标定向带来困难
循环前缀长度	用于减缓多径干扰，保证子载波正交性	导致模糊副峰或旁瓣

4.1 波形特性与模糊函数修正

模糊函数是分析雷达波形的有效工具，它描述

了雷达系统所采用波形具有的距离分辨力、杂波抑制能力等潜在性能,其一般定义式为

$$A(\tau, f_d) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t - \tau) \exp(-j2\pi f_d t) dt \right| \quad (2)$$

其中, $s(t)$ 为信号复包络, τ 表示时延, f_d 为多普勒频移。对雷达而言,通常情况下,设计波形的理想目标是图钉状模糊函数,其具有单一的中心峰值,且其余能量均匀地分布于时延-多普勒平面。不存在第2峰值意味着没有距离和多普勒模糊,而基底均匀且平坦表明旁瓣均匀,可以有效地减小遮挡效应。

在本次实验中使用的 OFDM 信号基本参数如表3所示,基带信号的模糊函数如图6所示。

表3 OFDM 参数

参数	数值
有效部分长度 T_u (ms)	21.33
保护间隔长度 T_g (ms)	5.33
符号长度 T_s (ms)	26.66
数据帧长度 T_f (ms)	400
子载波个数 N_k	256
信号带宽 B (kHz)	20

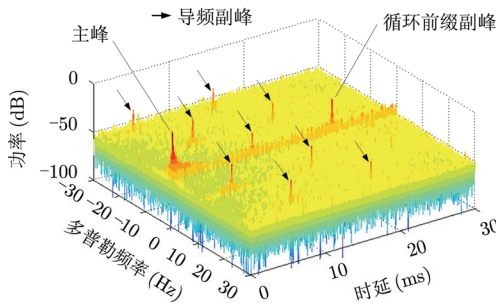


图6 OFDM 信号的模糊函数

OFDM 系统因通信需要而在每个符号中加入了 CP,使得在模糊函数时延剖面 T_u 位置出现副峰,称为循环前缀副峰。梅花状导频的分布,即在频率和时间上的等间隔分布使得信号在一定的时间间隔和频率间隔位置具有相关性而产生副峰,称为导频副峰,经过分析得知,导频副峰的位置和导频图案的选择、导频数值的选择及导频的插入密集程度有关。本系统中增益导频子载波序号 k_g 的子集为

$$\{k_g \mid k_g = 2 \times (s \bmod 3) + 6 \times p + 1\}$$

其中 p 为整数, s 为 OFDM 符号序号。分布规律为:同一符号载波间隔为 6,相邻符号频率轴间隔为 2,

以 3 个符号为重复周期。仅考虑导频值,将 3 个连续符号内导频的 OFDM 符号 $u(t)$ 分别表示为: $u_0(t), u_1(t), u_2(t)$, 都可看作是频率间隔为 $6/T_u$ 的多个正弦信号叠加,在时域会表现出一定的周期性,且周期为 $T_u/6$,求得 $u_0(t)$ 的自相关函数 $A_0(\tau)$,副峰将位于:

$$B_0 = \{(f_d = 0, \tau = nT_u/6) \mid 1 \leq n \leq 6, n \in Z\} \quad (3)$$

每个符号导频分布规律一致,只是初始载波不一样,相邻符号频率轴间隔 2,设 $\omega_u = 2\pi/T_u$,则 $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 的自相关函数可表示为

$$\begin{cases} A_1(\tau) \approx \exp(j2\omega_u \tau) A_0(\tau) \\ A_2(\tau) \approx \exp(j4\omega_u \tau) A_0(\tau) \end{cases} \quad (4)$$

且副峰也位于 B_0 。则 $u(t)$ 符号内的自相关函数为

$$\begin{aligned} A(\tau) \Big|_{\tau \in B_0} &= A_0(\tau) + A_1(\tau) + A_2(\tau) \\ &= A_0(\tau) [1 + \exp(j2\omega_u \tau) + \exp(j4\omega_u \tau)] \\ &= \begin{cases} 3A_0(\tau), & \tau = 3 \cdot T_u/6 \\ 3A_0(\tau), & \tau = 6 \cdot T_u/6 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,集合 B_0 中 $n=3$ 或 $n=6$ 时, $u(t)$ 在符号内自相关副峰位于:

$$C_0 = \{(f_d = 0, \tau = nT_u/6) \mid n = 3, 6\} \quad (6)$$

考虑多普勒频率,根据 3 个符号为重复周期,即在频率 $1/(3T_s)$ 整数倍位置可能出现副峰,用上述的分析方法,同理可得副峰位置集合 C_1, C_2 为

$$C_1 = \{(f_d = m/(3T_s), \tau = nT_u/6) \mid m = -2, 1; n = 1, 4\} \quad (7)$$

$$C_2 = \{(f_d = m/(3T_s), \tau = nT_u/6) \mid m = -1, 2; n = 2, 5\} \quad (8)$$

由式(6)-式(8)可知增益导频符号内的自相关副峰位于 $C = C_0 \cup C_1 \cup C_2$ 如图7所示。

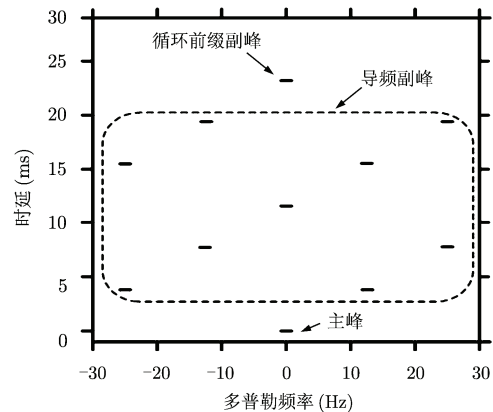


图7 OFDM 信号的模糊函数副峰分布

在雷达系统中，通过计算直达波和目标回波的互模糊函数以实现对动目标的探测，根据峰值出现的位置来提取目标的距离和多普勒参数。模糊函数中副峰的出现会形成虚假目标，而且强目标回波引起的副峰可能会掩盖弱目标回波信号，因此，需要对 OFDM 信号作一些预处理，以抑制 OFDM 信号周期性结构所引起的模糊副峰雷达探测的不利影响。关于模糊副峰抑制的方法很多^[19]，但是总的思想是降低信号的相关性，较为简单的处理方法包括：导频信号置零、正交化导频序列或者随机化导频序列。

对于由循环前缀导致的副峰，通过在同步之后丢弃循环前缀部分(相当于置零)然后再进行距离多普勒处理。对于导频引起的副峰，可以在距离多普勒处理前对参考通道信号导频位置进行相位随机化处理，使之与监测通道信号导频信号正交或者随机化，从而降低相关性。

4.2 通信信号解调和参考信号重构

由于信号具有不同的鲁棒模式，通信信号解调过程中需要进行信号模式的识别以确定基本的信号参数。根据它们的循环前缀与有效符号部分时间长度的比例不同，然后利用该模式的符号参数在多个符号内进行循环前缀与其母本的滑动相关运算，最后根据最强相关峰值确定当前模式。

解调过程中需要进行时间同步、频率同步和帧同步。时间同步可采用基于循环前缀定时同步算法。频率同步包括小数倍频偏估计和整数倍频偏估计，小数倍频偏估计可根据循环前缀的相关函数的累积相位来判断，整数倍频偏可以根据频率导频来进行判断。帧同步则可以利用时间导频来进行估计^[20,21]。设 $\{S_k\}$ 和 $\{R_k\}$ 分别为发送和接收序列，则整个同步的过程如图 8 所示。

在增益导频图案已经设定的情况下，可供选择的信道估计算法有很多，主要有线性插值估计算法、Wiener 滤波估计算法和基于 DFT 的信道估计算法等。具体实现时候都是先估计出导频信号处的信道响应，然后再采用具体的插值算法估计出整个

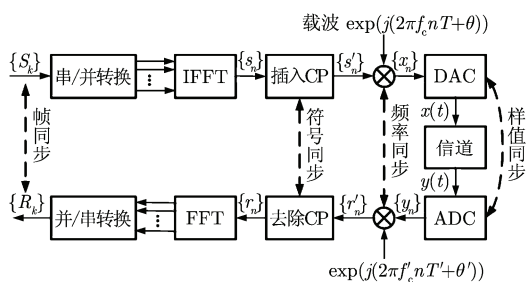


图 8 OFDM 系统中的各种同步

信道的频率响应，并基于估计值对接收信号加以均衡^[22]。

在雷达探测过程中，一般需要利用波束形成技术将阵列波束指向发射台方向以形成参考通道，并尽可能提高参考信号纯度。在雷达与通信集成系统中，可以通过重构算法提纯参考信号。当信号被完整解调出来之后，便可以利用已知的调制方法进行参考信号重构。将重构信号与提纯后的接收信号进行对比，可以验证基于重构的探测方法的有效性。试验中接收信号与重构信号的对比结果如图 9 所示，图中两条曲线分别表示接收信号的自相关结果和接收信号与重构信号的互相关结果，由图可以看出，两条曲线几乎重合，且两相关峰相对基底的高度基本相同。对比结果表明重构信号与接收信号拥有较理想的相关性，也同时验证了整套重构算法的有效性。

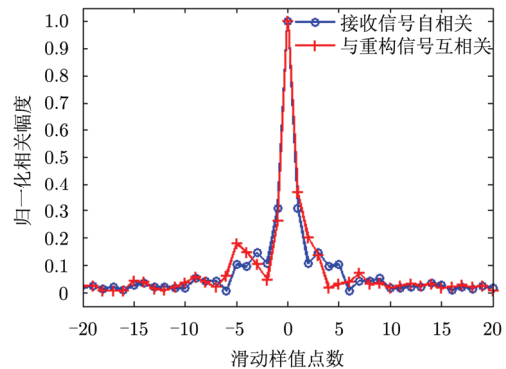


图 9 接收信号与重构信号的对比结果

4.3 匹配滤波与相干积累

雷达系统通过参考通道获取参考信号，通过监测通道获取的目标回波信号。监测通道和参考通道信号经采样、正交变换和下变频后得到基带信号。基带信号中除了感兴趣的目标回波和直达波信号外，还包含大量的多径杂波、环境干扰等成分。双通道数据经过参考信号提纯、多径杂波抑制、匹配相关、相干积累、目标检测和跟踪等步骤得到目标参数信息。短波段雷达通常通过长相干积累以得到较高的频率分辨率，相干积累巨大的计算量给系统实时化带来严峻挑战。国内外学者提出了多种快速的计算方法，一般都需将信号分段。本系统中，将采样信号分段，划分成快时间信号和慢时间信号，对快时间信号做距离谱，通过 FFT 处理慢时间信号得到距离多普勒谱，其流程如图 10 所示。

动目标回波信号可用经目标运动调制后发射样本表示，对于窄带信号，一般可以忽略因调制引起

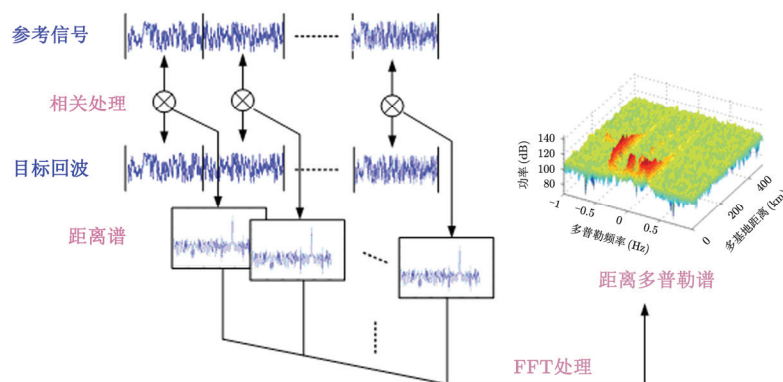


图10 距离多普勒谱的处理流程

的回波包络变化等效效应。通过互模糊函数测量目标多普勒频偏可以获得目标的径向速度，由于动目标速度分辨率受限于信号的时长，根据需要确定时长进行相干累积。

4.4 目标检测与跟踪

对于在时变信道下工作的短波通信与雷达集成系统，要在不同噪声、杂波和干扰背景下检测目标信号，应采用恒虚警检测器以保证虚警概率恒定的同时得到高的检测概率。为了降低计算量，可在恒虚警检测前先进行峰值检测。恒虚警检测器有适用于不同噪声或杂波分布下的自适应设置门限、非参量型检测器、杂波图等方法^[23]。

对于低信噪比目标的检测取决于接收机内部/外部噪声、干扰抑制效果、直达波抑制效果、相干累积时间长短等因素，灵敏度/探测精度/距离是由雷达波形和工作参数决定的，以上因素决定了系统的探测威力。经过恒虚警目标检测后，仅能获取目标相对于直达波的距离差和投影在双基地角平分线上的速度信息，因此要获取目标的实际位置和速度还需要目标的方位信息。实际中可采用波束形成和超分辨率测向方法对目标定向。当有可信方式证实目标确实存在而不是虚警的时候，而且目标存在时间足够长，则可以根据目标的方位、距离和速度信息进行关联并估计目标的航迹，通过雷达调度和控制，产生自动跟踪过程并形成航迹文件。

本实验选用基于 OFDM 调制解调理论的参考信号重构方法来提取参考信号。基带信号首先经过通信解调恢复出发射端传送的纯净比特流信息，然后经物理层调制重构出直达波信号。通信解调的目的是为了获取发射端传送的通信信息，它包含同步、信道估计和信道解码几个步骤。系统信号处理流程如图 11 所示。

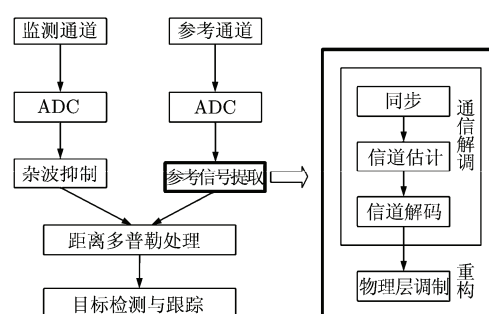


图11 信号处理流程

5 实验结果

5.1 系统介绍

武汉大学新近研制的主被动一体化高频地波雷达系统基于软件无线电思想设计，其发射波形产生与接收信号采集均采用全数字方案，从而具有很好的通用性和可扩展性，是一部兼容多基地、多频率、多波形，并且可实现多功能探测的实验系统。系统可工作频段为 8-25 MHz，发射根据需要可采用三元组合单极天线或对数周期天线，接收天线单元采用无源的宽频带单极螺旋天线，接收系统可依需求配置为 16-32 通道，收发系统结构示意图如图 12 所示。由于 OFDM 系统对时钟有较高要求，系统分别为信号发生装置与数字接收机配备了超高稳 GPS 时钟源作为基准时钟，即框图中的 10 MHz 时钟产生模块，系统时钟为 80 MHz，由时钟源倍频后得到。

5.2 实验场景及参数

通信信号发射站位于山东青岛沿海，接收站位于山东烟台沿海，系统收发站地理布局如图 13 所示，收/发两站之间相距约 50 km。发射站产生如表 3 所示 OFDM 连续波信号，数据采用 64QAM 标准映射，调制信号内容为某图片数据，发射信号经由 2 kW 功率放大器输出，载频为 8.2 MHz，信号带宽为 20 kHz。

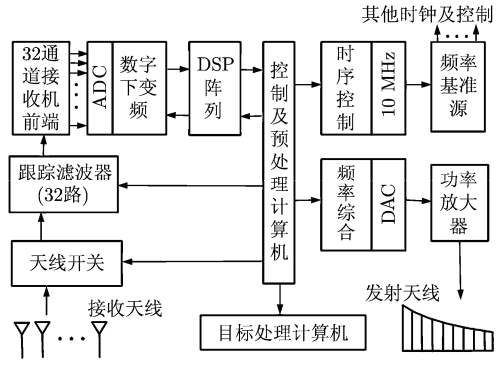


图 12 集成系统总体结构框图

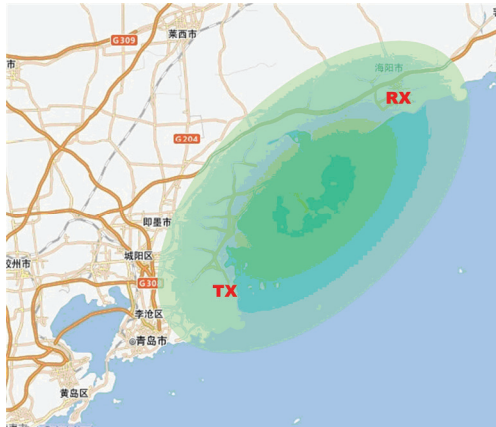


图 13 收发站位置布局

接收机射频直接采样率设为 48 MHz，经正交变换和数字下变频(DDC)后得到基带采样率为 24 kHz，将接收系统配置为 16 通道，16 元接收天线排成线阵，阵列法线方向根据收/发站地理位置进行确定，由图 13 中的站点分布位置可知，发射信号可以经过地波传播模式或者天波模式到达接收阵列。

5.3 集成实验通信结果

短波段电磁环境非常拥挤，存在大量广播通信电台干扰，此外受电离层影响，电磁环境在不同时段或不同地点有很大差异，所以不同时段接收信号的好坏存在显著差异。在短波通信与雷达集成实验中，通信效果与探测结果好坏具有明显的一致性。图 14 展示本次试验不同信道环境下的 64QAM 的星座图。

实验中发送的图片为图像处理领域常用的名为 camera man 的图片作为信源，图 15 通过选取不同时间段的解调结果说明不同信道条件下的通信效果。

5.4 集成实验探测结果

通过对系统配置不同的参数，可使该集成系统分别工作在不同的探测模式，进行高/低速目标探测和海洋回波谱的提取。在同频率同波形的情况，不同信道情况下的实测回波谱如图 16。

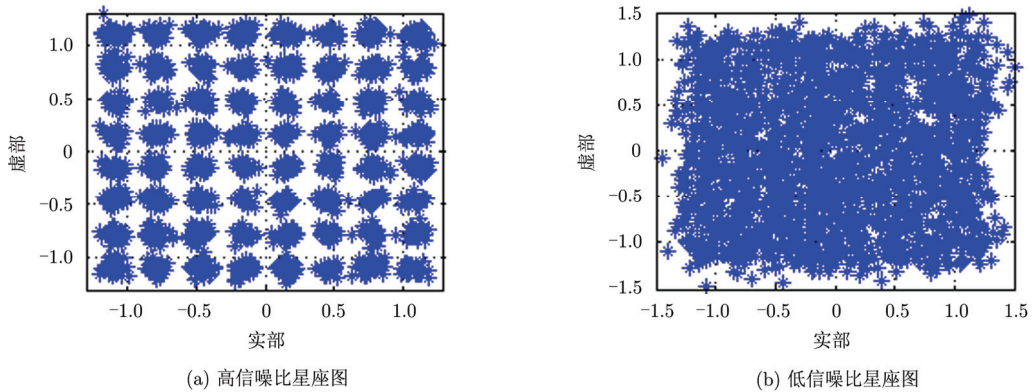


图 14 不同信噪比下的接收信号星座图



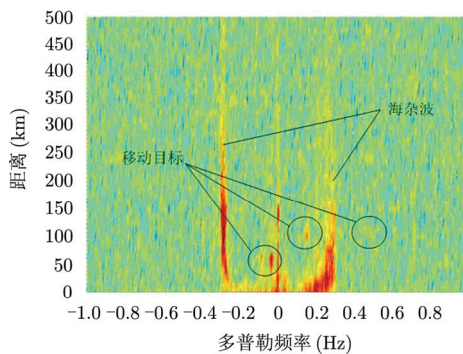
(a) 信源



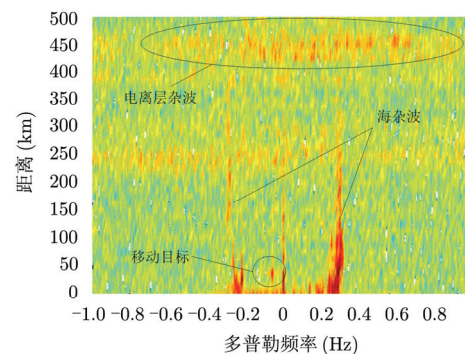
(b) 接收信号(误比特率为 0)

(c) 接收信号(误比特率为 $1e-3$)(d) 接收信号(误比特率为 $1e-2$)

图15 不同信道条件下的通信结果



(a) 高信噪比探测结果



(b) 低信噪比探测结果

图16 不同信噪比探测结果

6 结论

短波通信与超视距雷达一体化实验平台集成了传统通信系统的数据传输功能,同时具有高频天/地波雷达和双/多基地雷达的多种优点,还可进行组网以扩大覆盖范围,可同时用于短波通信、海洋环境监测、移动目标探测等领域,节约了系统成本和频谱资源,具有广阔的应用前景。

本文实验结果证实了 OFDM 信号既是优秀的通信信号,也是良好的雷达信号,是短波通信与超视距雷达一体化技术的一次大胆的尝试,为超视距雷达多功能化及组网探测等技术提供了现实依据。

参考文献

- [1] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 1-31.
Jiao Pei-nan and Zhang Zhong-zhi. Radar Environment and Wave Propagation Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 1-31.
- [2] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Zhou Wen-yu and Jiao Pei-nan. Over-the-horizon Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [3] 万显荣, 赵志欣, 柯亨玉, 等. 基于DRM数字调幅广播的高频外辐射源雷达实验研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 11-18.
Wan Xian-rong, Zhao Zhi-xin, and Ke Heng-yu, et al. Experimental research of HF passive radar based on DRM digital AM broadcasting[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 11-18.
- [4] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-17.
Zhang Ming-you. The Conspectus of Radar-Electronic Warfare-Communication Integration[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1-17.
- [5] Xing S and Xiang L P. Radar embedded communication technology study[C]. Radar (Radar), 2011 IEEE CIE International Conference, 2011: 1000-1003.
- [6] Xu S J, Chen Y, and Zhang P. Integrated radar and communication based on DS-UWB[C]. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, The Third International Conference, 2006: 142-144.
- [7] Lin Zhiyuan and Wei Ping. Pulse position modulation time hopping ultra wideband sharing signal for radar and communication system[C]. International Conference on Radar, 2006, CIE'06, 2006: 1-4.
- [8] Sturm C and Wiesbeck W. Waveform design and signal

- processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [9] Surender S C and Narayanan R M. UWB noise-OFDM netted radar: physical layer design and analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1380-1400.
- [10] 李晓柏, 杨瑞娟, 陈新永. 基于分数阶傅里叶变换的雷达通信一体化信号共享研究[J]. *信号处理*, 2012, 28(4): 487-494.
Li Xiao-bo, Yang Rui-juan, and Chen Xin-yong. Radar communications integration signal sharing research based on fractional Fourier transform[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(4): 487-494.
- [11] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. *雷达学报*, 2012, 1(2): 109-123.
Wan Xian-rong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109-123.
- [12] Sen S and Nehorai A. Target detection in clutter using adaptive OFDM radar[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(7): 592-595.
- [13] Braun M, Sturm C, Niethammer A, *et al.* Parametrization of joint OFDM-based radar and communication systems for vehicular applications[C]. 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009: 3020-3024.
- [14] Hutter A A. Design of OFDM systems for frequency-selective and time-variant channels[C]. 2002 International Zurich Seminar on Broadband Communications, 2002, Access, Transmission, Networking, 2002: 31-39.
- [15] Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification[S]. V2.3.1 ed. 2012.
- [16] Wang Xiaochun, Besong S O, Yu Xiaoyou, *et al.* A novel PAPR reduction method for advanced wireless and mobile OFDM system[C]. 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011: 1-4.
- [17] Gao Weihua, Yan Yanjun, Osadciw L, *et al.* A two stage PAPR reduction method on frequency redundant OFDM system[C]. 2010 25th Biennial Symposium on Communications (QBSC), 2010: 416-420.
- [18] Sang-Woo K, Hun-Hee L, Chan-Ho P, *et al.* A PAPR reduction method using the correlation of information in OFDM communication system[C]. Third International Conference on Information Technology and Applications, 2005, ICITA 2005, 2005: 330-333.
- [19] Zhao Z, Wan X, Zhang D, *et al.* An experimental study of HF passive bistatic radar via hybrid sky-surface wave mode[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, DOI: 10.1109/TAP.2012.2213062.
- [20] Sha Y, Li M, Gao Y, *et al.* Joint OFDM synchronization algorithm based on special training symbol[C]. 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC), 2010: 433-437.
- [21] Yuan F, Shuru L, Nana L, *et al.* A new OFDM synchronization algorithm using training cyclic prefix[C]. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011: 1489-1491.
- [22] Larsen M D, Seco-Granados G, and Swindlehurst A L. Pilot optimization for time-delay and channel estimation in OFDM systems[C]. 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011: 3564-3567.
- [23] Skolnik Merrill I. 雷达手册[M]. 第3版, 北京: 电子工业出版社, 2010: 262-298.
Skolnik Merrill I. Radar Handbook[M]. Third Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 262-298.

作者简介



邵启红(1982-), 男, 武汉大学电子信息学院博士研究生, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理、OFDM 信号处理。

E-mail: qihongshao@163.com



张德磊(1988-), 男, 1988 年生, 硕士, 研究方向为雷达信号处理。



万显荣(1975-), 男, 博士, 武汉大学电子信息学院, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 研究方向为无源雷达、超视距雷达、新体制雷达系统与雷达信号处理等。主持和参加国家级科研项目 10 余项, 发表 SCI/EI 检索论文 40 余篇。



赵志欣(1986-), 女, 武汉大学电子信息学院博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail: zzzxinlove@163.com