

分布式数字广播电视外辐射源雷达系统同步设计与测试

万显荣* 孙绪望 易建新 吕敏 饶云华

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘 要: 数字广播电视是外辐射源雷达的重要机会照射源, 分布式多基地结构是外辐射源雷达的发展趋势。新一代的数字广播电视广泛采用网络化覆盖方式, 这为外辐射源雷达分布式组网探测提供了天然条件, 同时也对外辐射源雷达系统设计提出了更高的要求。其中首先要解决的是接收站与照射源、多个单元接收站之间的同步问题, 主要包括频率和时间同步。该文针对数字广播电视信号和外辐射源雷达结构特点, 分析了分布式外辐射源雷达系统同步需求, 设计了基于全球定位系统(GPS)授时技术的同步方案。利用中国移动多媒体广播信号帧结构特殊性, 提出了一种系统同步测试方法, 并结合分布式多站实验, 通过实测数据分析, 验证了该同步方案的可靠性。

关键词: 外辐射源雷达; 分布式雷达系统; 数字广播电视; 全球定位系统(GPS); 同步

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)01-0065-08

DOI: 10.12000/JR16134

引用格式: 万显荣, 孙绪望, 易建新, 等. 分布式数字广播电视外辐射源雷达系统同步设计与测试[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 65-72. DOI: 10.12000/JR16134.

Reference format: Wan Xianrong, Sun Xuwang, Yi Jianxin, *et al.*. Synchronous design and test of distributed passive radar systems based on digital broadcasting and television[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 65-72. DOI: 10.12000/JR16134.

Synchronous Design and Test of Distributed Passive Radar Systems Based on Digital Broadcasting and Television

Wan Xianrong Sun Xuwang Yi Jianxin Lü Min Rao Yunhua

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Digital broadcasting and television are important classes of illuminators of opportunity for passive radars. Distributed and multistatic structure are the development trends for passive radars. Most modern digital broadcasting and television systems work on a network, which not only provides a natural condition to distributed passive radar but also puts forward higher requirements on the design of passive radar systems. Among those requirements, precise synchronization among the receivers and transmitters as well as among multiple receiving stations, which mainly involves frequency and time synchronization, is the first to be solved. To satisfy the synchronization requirements of distributed passive radars, a synchronization scheme based on GPS is presented in this paper. Moreover, an effective scheme based on the China Mobile Multimedia Broadcasting signal is proposed to test the system synchronization performance. Finally, the reliability of the synchronization design is verified via the distributed multistatic passive radar experiments.

Key words: Passive radar; Distributed radar system; Digital broadcast and television; GPS; Synchronous

收稿日期: 2016-11-30; 改回日期: 2017-01-17; 网络出版: 2017-02-17

*通信作者: 万显荣 xrwan@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502403), 国家自然科学基金(61331012, 61371197, U1333106, 61271400), 湖北省支撑项目(2015BCE075), 湖北省自然科学基金(2016CFA061), 博士后创新人才支持计划(BX201600117)

Foundation Items: National Key Research and Development Program (2016YFB0502403), The National Natural Science Foundation of China (61336102, 61371197, U1333106, 61271400), Support Program of Hubei Province (2015BCE075), The Natural Science Foundation of Hubei Province (2016CFA061), Postdoctoral Innovation Talent Support Program (BX201600117)

1 引言

外辐射源雷达是一种利用非合作辐射源(如广播电视、通讯基站、导航和通信卫星、无线局域网等)对目标进行探测的双/多基地雷达系统。与传统主动雷达相比,具有无需频率分配、隐蔽性好、抗干扰能力强、电磁兼容性好等诸多优势^[1]。单发单收结构的双基地外辐射源雷达理论方法及系统设计已日臻成熟,然而双基地架构存在着一些缺陷,如分辨率强烈依赖于收发站几何位置、目标散射截面积受限于目标姿态等,使其在探测稳定性和跟踪连续性上表现出不足^[2-6]。采用如图1所示的多发多收(包括多发单收、单发多收)分布式探测体制是有效的解决方案之一。中国新一代的数字广播电视广泛采用网络化覆盖模式,如中国移动多媒体广播(China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB)/数字地面多媒体广播(Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting, DTMB)/数字音频广播(China Digital Radio, CDR),其发射信号普遍利用了多载波体制的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制,信号带宽大,功率稳定,非常适合用作分布式外辐射源雷达的机会照射源。

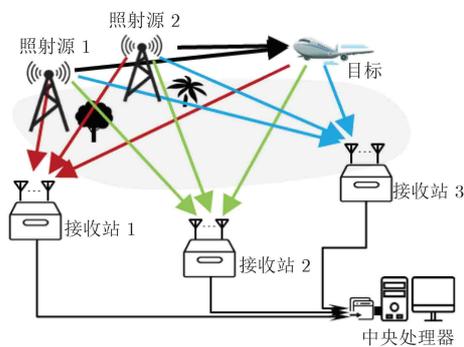


图 1 多发多收体制系统示意图

Fig. 1 Diagram of multi-transmitters and multi-receivers system

分布式外辐射源雷达在系统组成和收发处理上比传统雷达复杂,还有许多特殊的关键技术问题亟待解决,首当其冲的是各单元雷达接收站与辐射源的空间、频率、时间的同步。空间同步即波束同步,是指参与目标探测的雷达接收机和辐射源的主波束必须同时指向到同一个目标空间,才能使接收到的目标回波信号最强。频率同步主要包括载波同步和采样率同步:载波同步是指接收机的本地混频振荡器频率与照射源发射机的载波频率必须一致,才能将信号准确恢复到基带;采样率同步是指接收机实际采样率与标称采样率必须一致,否则,采样率偏差的积累会导致目标跟踪结果异常。时间同步

是指各发射站之间和各接收站之间均应有统一的时间基准,这是分布式雷达准确定位目标的前提。

上述三大同步问题中,空间同步较容易实现,这是因为数字广播电视基站发射天线多具有全向性,只需要人为控制各单元接收站天线波束指向同一目标空间即可。而由于发射站的不可控性,外辐射源雷达系统频率同步和时间同步的方案设计依赖于所用照射源发射系统本身的同步方式,并且系统同步性能的测试也比主动雷达更难。故本文重点讨论频率同步和时间同步的设计和测试问题。

传统双(多)基地雷达的同步方法可分为直接法、间接法和独立式法^[7],其中直接法多适用于主动雷达,独立式法的同步稳定性及精度相比而言都较差,因此分布式外辐射源雷达一般采用间接法。间接法是在各雷达站分别设置一个相同的高稳定度时钟,通过定期校准时钟,用来作为时间基准实现各雷达站间的时间频率同步。校准时钟信号的授时技术有:微波授时技术、光纤授时技术、卫星授时技术、激光授时技术。这些方法各有优劣,其中微波传输距离短,光纤缺乏机动性,激光易受遮挡,而卫星作用范围广、不受视距限制、且有良好的机动性,因此在实际应用中多基地外辐射源雷达的同步方式多采用卫星授时技术。文献^[8]指出,地面数字电视广播基站发射系统采用GPS接收机提供频率参考和时间参考,因此,基于此辐射源的分布式外辐射源雷达系统亦需采用GPS授时技术实现时间和频率同步。本文提出的同步方案核心是为每个单元接收站配置一个GPS接收模块,该模块为接收机提供高精度高稳定的10 MHz频率源和精确的1PPS(1 Pulse Per Second)定时信号,使系统实现频率同步和时间同步。并且,通过分析CMMB信号帧结构特点,本文提出了一种基于CMMB帧同步信号的同步性能测试方法,然后结合在江西南昌开展的分布式多站实验,通过实测数据分析,验证了系统同步的可靠性。

2 分布式外辐射源雷达系统同步需求

2.1 频率同步

数字广播电视信号广泛采用OFDM调制,OFDM调制技术具有良好的抗多径能力,各符号间带有保护间隔且子载波间是相互正交的。外辐射源雷达系统通常设有两个通道:参考通道和监测通道,其中参考通道波束一般正对信号发射站,用来接收直达波信号;监测通道波束对准目标空间,接收目标回波信号。与常规双(多)基地雷达一样,外辐射源雷达系统工作时,发射端将基带信号调制至射频进行发射,接收端通过混频等方式将信号解调

到基带, 这要求各单元接收机的本地混频载波与发射端上变频调制的载波频率一致。当接收站与发射站存在载波频偏(Carrier Frequency Offset, CFO)时, 系统的探测性能会受到影响: (1)使子信道之间产生干扰, 影响OFDM波形信号子载波的正交性, 从而会影响参考信号的重构, 而参考信号的重构效果又会直接影响杂波抑制和匹配滤波的效果^[9]; (2)影响监测信号中直达波和多径回波与参考信号之间的时域相关性, 从而会影响杂波抑制效果^[9]。

外辐射源雷达接收系统与发射系统采用的时钟源相互独立, 那么, 发射端数模转换的采样时钟频率与接收端模数转换的采样时钟频率不可避免地存在偏差。在实际情况下, 对外辐射源雷达来说, 一般认为发射系统采样时钟频率高度精确稳定。此时, 采样率偏差为接收系统实际采样率与标称采样率的偏差, 在时域上表现为一定时间内采样数据点数与理论值有偏差。该偏差同样对系统探测性能存在不利影响: (1)使OFDM信号帧起始位置与采样时刻不对应, 导致同步算法计算结果错误, 影响参考信号的重构^[10]; (2)使杂波对消后残余能量变多, 同时也会降低重构信号和目标信号的相关积累增益^[11]。

2.2 时间同步

对于传统主动双基地雷达, 准确测距的前提之一是接收系统与发射系统间有相同的时间参考, 在主动多基地雷达中, 还要求各发射站之间和各接收站之间时间同步。外辐射源雷达则有所不同, 其发射系统不受控且发射信号未知, 因此无法也无需实现接收站与发射站之间的时间同步。外辐射源雷达通过在接收端设置参考通道获取参考信号, 将其提纯后与监测通道信号作匹配滤波计算来获取距离-多普勒谱。对于分布式数字广播电视外辐射源雷达系统而言, 各发射站间的时间同步已由开发商完成, 因此只需要考虑各接收站之间的时间同步。

分布式外辐射源雷达多站时间同步精度首先影响目标的双基距离, 在时差定位时进一步影响定位精度。以单发多收结构为例。若多站时间同步精确, 各单元接收站与照射源构成的双基地椭圆交于一点, 即能准确定位目标^[12]。若多站时间同步存在偏差, 则各单元接收站与照射源构成的双基地椭圆并不交于一点, 而是由椭圆两两相交形成一个目标区域, 由此导致目标定位不精确。

分布式外辐射源雷达进行目标定位时, 若每个单元接收站均能获得良好的参考信号, 那么各单元接收站都能准确测得目标双基地距离。若各站存在时间同步偏差 τ , 那么, 各站对目标定位偏差由目标速度 v 与 τ 的乘积表征。然而, 在实际环境中, 各接收站所在位置的环境差异性很大, 导致所获取的

参考信号质量有好有坏, 甚至于部分接收站所获取的参考信号重构效果极差而无法使用, 那么需选用其中一个接收站的高质量参考信号作为其他接收站的参考信号, 才能实现多站联合探测目标。此时, 各站对目标定位偏差由电波传播速度 c 与 τ 的乘积表征^[13]。显然, 实际情况下分布式外辐射源雷达系统对各接收站时间同步精度提出了更高的要求。

3 同步方案设计

3.1 同步系统

一般情况下, 多基地外辐射源雷达系统接收站与发射站的空间位置分布稀疏且相距较远, 采用全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)授时技术是较符合实际且精度较高的同步方案^[14]。其中, GPS是4种主要GNSS之一, 应用最广泛, 同时考虑到目前数字广播电视基站发射系统普遍采用基于GPS的同步方式, 因此, 本文设计的基于数字广播电视分布式外辐射源雷达系统同步方案选用GPS接收模块, 为接收机提供精确的同步频率源和时钟源, 使各接收站联合形成一个统一的雷达探测网。系统如图2所示, GPS接收模块获取GPS定位与时间信息, 并产生与GPS卫星时间高度同步的1PPS和用1PPS驯服恒温晶振而得到的高精度高稳定性10 MHz时钟信号。把该驯服时钟作倍频处理后, 用作雷达接收机的工作时钟, 使分布式外辐射源雷达系统实现频率同步。同时, 各单元接收机响应1PPS信号上升沿, 产生启动采样指令, 使分布式外辐射源雷达系统实现时间同步。

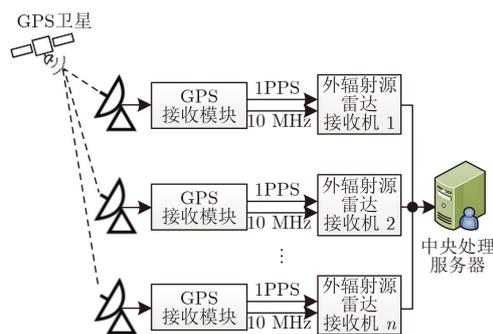


图2 系统同步框图

Fig. 2 Diagram of system synchronization

3.2 GPS接收模块

系统选用的GPS接收模块是某款集成了恒温高稳晶振OCXO和高精度授时型GPS OEM板, 采用大规模集成电路和GPS频率测控技术, 产生并发送精确稳定的定时信号(1PPS)和频率信号(10 MHz), 为系统提供高精度的时间和频率参考信号。表1为输出10 MHz频率信号参数, 表2为1PPS信号参数。

表 1 10 MHz频率信号参数

Tab. 1 Parameters of the 10 MHz signal

参数	参数值
准确度	$<10^{-12}$ (24小时平均值)
保持精度	$<5 \times 10^{-12}$ (GPS断开, 24小时内)
每秒稳定度	$<10^{-11}$
相位噪声	-80 dBc/Hz@1 Hz; -140 dBc/Hz@1 kHz

表 2 1PPS信号参数

Tab. 2 Parameters of the 1PPS signal

参数	参数值
授时精度	30 ns (RMS)
上升沿时间	<10 ns
占空比	1:1

4 同步测试原理

4.1 辐射源信号选择

在前述的国内3种已投入商用的数字广播电视中, CMMB因其特殊的信号帧结构^[15], 可以用来验证分布式外辐射源雷达系统同步性能。CMMB信号帧结构如图3所示, 定义1帧信号时长为1 s, 并将其划分为40个时隙, 每个时隙长25 ms, 又可划分为1个CMMB信标和53个OFDM符号。其中信标是同步的关键, 它包括1个发射机标识信号(TxID)以及2个内容完全一样的同步信号, 同步信号存在于每个时隙的起始位置, 时长为409.6 μ s。OFDM符号的有效子载波分配为数据子载波、离散导频和连续导频, 其中连续导频中包含时隙号信息, 离散导频包含384个子载波。

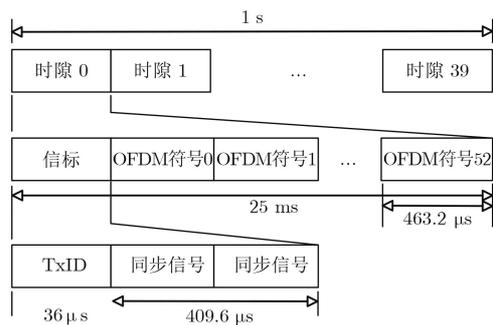


图 3 CMMB信号帧结构

Fig. 3 Framing structure of CMMB signal

4.2 频率同步测试原理

4.2.1 载波同步 利用CMMB同步信号的时域相关性和频域共轭特性可估计接收机系统的CFO^[16]。先对采样数据进行符号粗同步, 找到CMMB时隙中同步信号的大概位置, 然后利用同步信号进行CFO估计, 计算出采样信号CFO值。

符号粗同步是利用加窗检测峰值的方法捕获同步信号的大致位置^[17], 表达式为:

$$R(n) = \left| \sum_{i=n}^{n+N_{\text{sync}}} x(i) \times x^*(i + N_{\text{sync}}) \right|, 1 \leq n \leq 2N \quad (1)$$

其中, n 对应采样点的序号, N_{sync} 为同步信号的长度, $x(i)$ 是采样得到CMMB信号, N 为1个时隙的CMMB信号长度。滑动相关后的峰值点位置即为粗同步所捕获的同步信号的起始位置。

捕获到同步信号位置后, 取出两个同步信号为 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$, 在存在载波偏差 Δf 的情况下, $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 表达为:

$$x_1(n) = \text{sync}(n) \exp(j2\pi\Delta f n T_b / N_b + j\Delta\varphi) + \text{awgn}(n T_b / N_b) \quad (2)$$

$$x_2(n) = \text{sync}(n) \exp(j2\pi\Delta f (n + N_b) T_b / N_b + j\Delta\varphi) + \text{awgn}(n T_b / N_b) \quad (3)$$

其中, $\text{sync}(n)$ 为发射端产生的同步信号, T_b 为同步信号时长, N_b 为同步信号采样点数, $\Delta\varphi$ 为信号中固定相位偏转, $\text{awgn}(n)$ 为噪声。信号信噪比较高时, 忽略噪声的影响, 对 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 按式(1)运算有:

$$\begin{aligned} R &= \sum_{n=1}^{N_b} x_1^*(n) x_2(n) \\ &= \exp(j2\pi\Delta f T_b) \sum_{n=1}^{N_b} |\text{sync}(n)|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

对 R 求相位得 $\text{angle}(R)$, 则频偏表达式为:

$$\Delta f = \frac{\text{angle}(R)}{2\pi T_b} \quad (5)$$

$\text{angle}(R)$ 的范围为 $[-\pi, \pi)$, 归一化频偏值范围为 $[-0.5, 0.5)$, 将这种方法估计得到的频偏值称作小数倍频偏, 所估计频偏值最大为同步信号子载波间隔的一半, 当频率偏差继续增大时, 需再估计整数倍频率偏差 ΔF 。在粗同步有 m 个样值偏差的情形下, 此时 $x_2(n)$ 写为:

$$x_2(n) = \text{sync}(n - m) \exp(j2\pi\Delta F(n - m) T_b / N_b + j\Delta\varphi) + \text{awgn}(n T_b / N_b) \quad (6)$$

忽略噪声影响, 对式(6)作FFT处理, 得到频域同步信号为:

$$\begin{aligned} X_2(k) &= \exp(j\Delta\varphi) \exp(j2\pi k m / N_b) \\ &\quad \cdot \text{SYNC}(\langle k - \Delta F / T_b \rangle_{N_b}) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, SYNC为sync对应的频域信号。由式(7)可见, 整数倍的频率偏差会造成频域数据的循环移位, 样值偏差则会引起频域数据的线性相位旋转。

利用频域同步信号前后采样点共轭特性消除样值偏差后, 将接收的频域同步信号与本地已知的同步信号进行循环移位相关, 则可以求出整数倍频率偏差 ΔF 的大小, $\Delta F + \Delta f$ 即系统的总载波频偏。

4.2.2 采样率同步 采样率不准确会引起实际采样数据点数与理论值偏差。对于CMMB信号, 当标称采样率为10 MHz时, 理论上一帧信号有 10^7 个采样数据。由上述载波频偏估计算法算得采样信号的CFO后, 先补偿该CFO, 然后进行符号精同步可以得到同步信号准确位置, 计算相邻信号帧第1个同步峰间隔的数据点数, 与理论值比较, 即可验证采样率同步性能。

补偿采样信号的CFO后, 进行符号精同步。文献[16]已证明, CMMB时域同步信号 $x_b(k)$ 具有共轭对称的特性:

$$x_b^*(k) = x_b(N_b - k), k \neq 0 \quad (8)$$

且同步信号一共存在4对长为1024点的共轭对称的数据块, 基于共轭数据块的相关结果呈现离散单峰的特性, 可以准确地找到时隙同步位置。选取第1和第4个共轭数据块作相关:

$$R(k) = \sum_{n=0}^{1024-1} x_b(k+n)x_b(k+4096-n) \quad (9)$$

k 为滑动相关的起始点。同步信号的能量为:

$$P(k) = \sum_{n=0}^{1024-1} (|x_b(k+n)|^2 + |x_b(k+4096-n)|^2) \quad (10)$$

最强峰值对应准确的同步位置 k_{ML} 为:

$$k_{ML} = \arg \max_k (|R(k)|^2 / P(k)) \quad (11)$$

4.3 时间同步测试原理

发射站信号到达各单元接收站的时间差与相应收发对间距离差成正比关系, 比例系数为电波传播速度。通过GPS接收模块获取发射站与接收站的位置信息, 可计算得收发站间距离差, 进而计算得信号到达各单元接收站的理论时间差。然后通过分析各单元接收站的采样数据, 计算出信号到达各单元接收站的量测时间差。比较量测时间差与理论时间差即可验证系统时间同步性能。

采样数据序列经过精同步处理后得到的最强峰位置 k_{ML} 与采样数据起点的时间差为:

$$\Delta t = k_{ML} / f_s \quad (12)$$

其中, f_s 为系统采样率。以图4所示站位场景为例, 发射站标记为Tx, 选取两个单元接收站, 分别标记为Rx_m, Rx_n。取距Tx最远的单元接收站Rx_m为参考, 接收站Rx_m, Rx_n采样数据中同一帧中同一时隙的同步信号相关峰值位置分别记为 $k_{ML,m}$, $k_{ML,n}$ 。

$k_{ML,m}$, $k_{ML,n}$ 与各自采样数据起点的时间差记为 Δt_m , Δt_n , 那么信号到达Rx_m, Rx_n量测时间差为:

$$\Delta t_{mn} = \Delta t_m - \Delta t_n = \frac{k_{ML,m} - k_{ML,n}}{f_s} \quad (13)$$

通过GPS定位信息可以获知Rx_m, Rx_n到Tx的基线距离差 ΔL_{mn} , 电波传播速度记为c, 取值 3×10^8 m/s, 由此计算得信号到达Rx_m, Rx_n的理论时间差 $\Delta t'_{mn}$ 为:

$$\Delta t'_{mn} = \frac{\Delta L_{mn}}{c} \quad (14)$$

Δt_{mn} 与 $\Delta t'_{mn}$ 的误差 ϵ_{mn} 为:

$$\epsilon_{mn} = |\Delta t_{mn} - \Delta t'_{mn}| \quad (15)$$

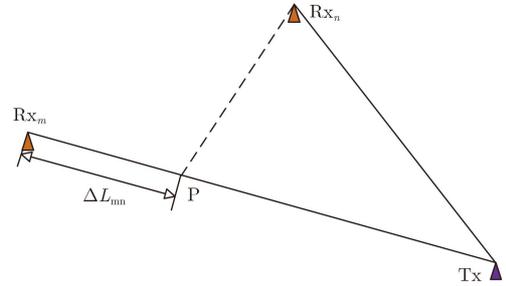


图4 分布式站位场景图

Fig. 4 Scene diagram of distributed system

5 分布式多站实验及结果

5.1 实验场景

为测试该分布式外辐射源雷达系统同步性能, 武汉大学于2016年7月在江西省南昌市开展了多站实验。实验系统包含3个单元接收站和1个非合作照射源, 系统参数如表3所示。实验站位场景图如图5所示, 其中3个接收站单元Rx1, Rx2, Rx3分别位于南昌大学前湖校区、华东交通大学、江西农业大学, 照射源Tx位于江西省电视台, 各接收站参考通道天线均正对照射源, 监测通道天线指向同一目标区域。根据GPS获取的各站点经纬度计算得Rx1, Rx2, Rx3距照射源Tx的距离量测值分别为12.714 km, 9.081 km, 13.749 km。

5.2 实测数据处理结果

5.2.1 频率同步——载波同步 分析各站连续100帧实测数据, 每一帧做一次频偏估计, 计算得到接收系统的载波频偏如图6所示。可以看出, 接收系统的载波频偏小于1 Hz。文献[8]提出, 单频网中各发射机频率精度偏差为1 Hz是可行的, 因此本设计实现的载波同步精度满足基于此的分布式外辐射源雷达的同步需求。通过后续CFO补偿可以进一步减小该CFO对杂波抑制和目标检测的影响。

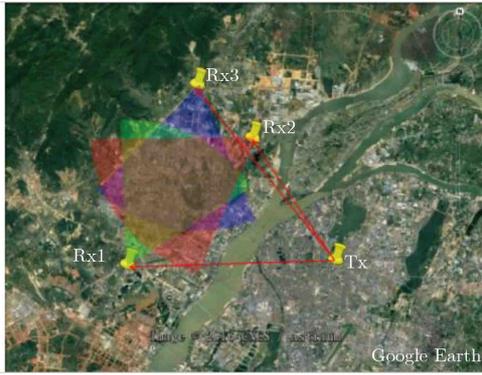


图 5 实验站场场景图

Fig. 5 Scene diagram of the experiment

表 3 实验系统参数

Tab. 3 Parameters of the experiment system

参数	参数值
Rx1位置	(E115.7941°, N28.6643°)
Rx2位置	(E115.8653°, N28.7406°)
Rx3位置	(E115.8277°, N28.7676°)
Tx位置	(E115.9234°, N28.6767°)
采样率	10 MHz
载波中心频率	714 MHz
信号带宽	8 MHz

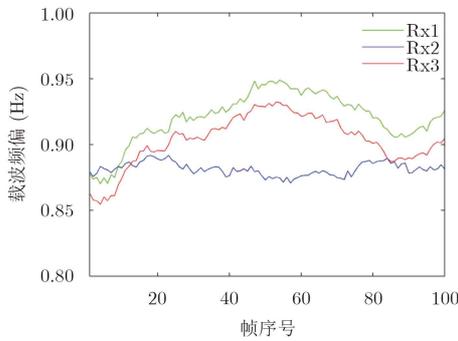


图 6 系统载波频偏估计值

Fig. 6 Measured values of system CFO

5.2.2 频率同步——采样率同步 分析各站连续100帧实测数据, 计算相邻信号帧的第1个同步峰间隔采样点数与理论值 10^7 的偏差, 结果如图7所示, 偏差均为0。这表明, 接收站实际采样率相对标称采样率的误差远小于 10^{-7} , 完全满足基于数字广播电视外辐射源雷达接收系统的采样率同步需求。

5.2.3 时间同步 对3个接收站多次同时启动采样的数据做同步分析, 以距照射源Tx最远的接收站Rx3的同步峰位置为参考, 接收站Rx1, Rx2与Rx3同步峰间隔采样点数分别稳定为35, 156, 三站同步峰相对位置如图8所示, 根据式(13)计算信号到达Rx1, Rx2, Rx3的量测时间差 Δt_{31} , Δt_{32} :

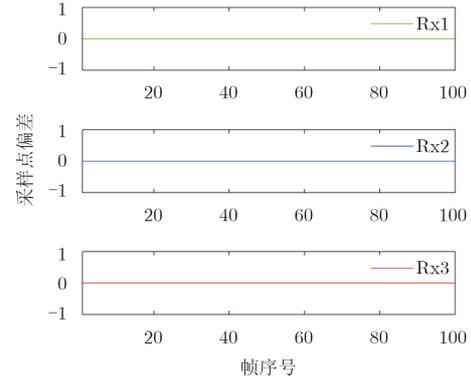


图 7 系统采样率偏差估计值

Fig. 7 Measured values of system sampling rate error

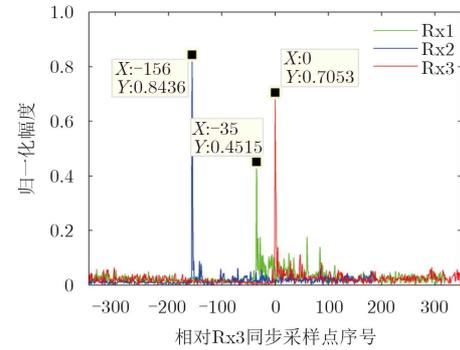


图 8 三站同步信号相对位置

Fig. 8 Relative positions of the synchronization signals received by the receivers

$$\Delta t_{31} = (k_{ML3} - k_{ML1})/f_s = \frac{35}{10^7} \text{ s} = 3.5 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\Delta t_{32} = (k_{ML3} - k_{ML2})/f_s = \frac{156}{10^7} \text{ s} = 1.56 \times 10^{-5} \text{ s}$$

根据GPS定位信息, 以接收站Rx3为参考, 根据式(14)计算可得信号到达Rx1, Rx2, Rx3的理论时间差为:

$$\Delta t'_{31} = \frac{\Delta L_{31}}{c} = \frac{13.749 \text{ km} - 12.714 \text{ km}}{c} = 3.450 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\Delta t'_{32} = \frac{\Delta L_{32}}{c} = \frac{13.749 \text{ km} - 9.081 \text{ km}}{c} = 1.556 \times 10^{-5} \text{ s}$$

将量测时间差与理论时间差对比, 三站时间同步误差分别为:

$$\varepsilon_{31} = |\Delta t_{31} - \Delta t'_{31}| = 5 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$\varepsilon_{32} = |\Delta t_{32} - \Delta t'_{32}| = 4 \times 10^{-8} \text{ s}$$

可以看出, 该误差量级为 10^{-8} , 且误差值非常接近GPS接收模块的标称定时精度, 表明系统时间同步设计性能良好, 符合基于数字广播电视分布式外辐射源雷达接收系统的同步需求。需要指出的是, 上述分析所得误差不仅来源于多站同步时间误差, 还来源于GPS接收模块定位误差和接收机采样的时间量化误差, 但此结果仍能说明该分布式外辐射源雷达系统的时间同步性能良好。

6 结束语

本文针对数字广播电视发射系统的同步原理, 设计并实现了基于此照射源的分布式外辐射源雷达系统同步方案。该方案采用GPS接收模块为接收系统提供精确稳定的10 MHz频率源和1PPS定时信号, 以实现雷达接收站与照射源、接收站与接收站之间的时间、频率同步。然后利用CMMB信号帧结构的特殊性, 提出了一种同步性能测试方法, 结合实验实测数据分析, 验证了该同步方案基本满足分布式外辐射源雷达系统的同步需求。另外, 分布式外辐射源雷达系统工作时, 往往默认发射站之间同步性能良好, 然而实际中难免存在发射站间频率和时间异步情况, 此时, 利用本文设计的同步性能良好的接收系统, 通过文中提出的测试方法, 同样可以测试发射站间的同步情况。

致谢 论文相关实验得到南昌大学王玉皞教授、赵志欣博士、洪升博士的协助, 在此表示感谢!

参考文献

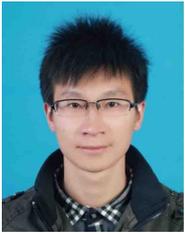
- [1] Howland P E, Griffiths H D, and Baker C J. Passive Bistatic Radar (Chapter in Bistatic Radar)[M]. Emerging Technology Wiley, Cherniakov Ed, ISBN 0470026308, 2008: 247-311.
- [2] 万显荣, 易建新, 程丰, 等. 单频网分布式外辐射源雷达技术[J]. 雷达学报, 2014, 3(6): 623-631.
Wan Xian-rong, Yi Jian-xin, Cheng Feng, *et al.*. Single frequency network based distributed passive radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(6): 623-631.
- [3] Daun M, Nickel U, and Koch W. Tracking in multistatic passive radar systems using DAB/DVB illumination[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(6): 1365-1386.
- [4] Radmard M, Karbasi S M, Khalaj B H, *et al.*. Data association in multi-input single-output passive coherent location schemes[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(3): 149-156.
- [5] Isohookana M and Pyykönen J. Design of a passive radar network[C]. Proceedings of the 7th European Radar Conference, Paris, France, 2010: 443-449.
- [6] Colone F, Bongioanni C, and Lombardo P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar. Part I: Target detection[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(4): 28-39.
- [7] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 207-213.
Yang Zhen-qi, Zhang Yong-shun, and Luo Yong-jun. Bistatic (Multistatic) Radar Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 207-213.
- [8] GB/T 2666-2011. 地面数字电视广播传输系统实施指南[S]. 中国国家标准, 2011.
GB/T 2666-2011. Implementation guidelines for transmission system of digital terrestrial television broadcasting[S]. Chinese National Standard, 2011.
- [9] 赵志欣, 万显荣, 谢锐, 等. 载波频偏对正交频分复用波形外辐射源雷达性能影响的研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 871-876.
Zhao Zhi-xin, Wan Xian-rong, Xie Rui, *et al.*. Impact of carrier frequency offset on passive bistatic radar with orthogonal frequency division multiplexing waveform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 871-876.
- [10] Searle S, Palmer J, and Davis L. On the effects of clock offset in OFDM-based passive bistatic radar[C]. 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2013: 3846-3850.
- [11] Baczyk M K, Kulpa K, Langellotti D, *et al.*. Evaluation of the impact of the sampling frequency offset on the performance of the passive radar based on DVB-T signal[C]. IEEE Radar Symposium, 2011: 333-338.
- [12] Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, Leung H, *et al.*. MIMO passive radar tracking under a single frequency network[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(8): 1661-1671.
- [13] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 181-186.
Sun Zhong-kang, Zhou Yi-yu, and He Li-xing. Active and Passive Positioning Technology of Bistatic and Multistatic Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 181-186.
- [14] Huang Yu-lin, Yang Jian-yu, Wu Jun-jie, *et al.*. Precise time frequency synchronization technology for bistatic radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(5): 929-933.
- [15] GY/T 220.1-2006. 移动多媒体广播第1部分: 广播信道帧结构、信道编码和调制[S]. 中国移动多媒体标准, 2006.
GY/T 220.1-2006. Mobile multimedia broadcasting part1: Framing structure, channel coding and modulation for broadcasting channel[S]. China Mobile Multimedia Broadcasting Standard, 2006.
- [16] 胡俊. 基于OFDM的移动多媒体广播系统同步技术研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2009.
Hu Jun. Research on synchronization in mobile multimedia broadcasting system based on OFDM[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2009.
- [17] 万显荣, 岑博, 易建新, 等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达参考信号获取方法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 338-343.
Wan Xian-rong, Cen Bo, Yi Jian-xin, *et al.*. Reference signal extraction methods for CMMB-based passive bistatic radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 338-343.

作者简介



万显荣(1975-), 男, 湖北天门人, 博士, 武汉大学, 教授, 博士生导师, 研究方向为新体制雷达设计, 如外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理。

E-mail: xrwan@whu.edu.cn



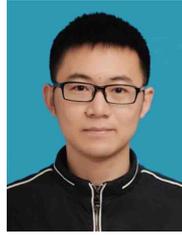
孙绪望(1990-), 男, 湖北黄冈人, 武汉大学电子信息学院在读硕士研究生, 研究方向为雷达系统设计和雷达信号处理。

E-mail: xuwang.sun@whu.edu.cn



易建新(1989-), 男, 湖南永州人, 博士, 武汉大学, 研究方向为雷达信号处理、目标跟踪和信息融合。

E-mail: jxyi@whu.edu.cn



吕敏(1991-), 男, 安徽宣城人, 武汉大学电子信息学院在读博士研究生, 研究方向为目标跟踪和信息融合。

E-mail: mlv@whu.edu.cn



饶云华(1972-), 男, 重庆人, 博士, 武汉大学, 副教授, 研究生导师, 研究方向为新体制雷达、雷达系统设计、无线通信网等。

E-mail: ryh@whu.edu.cn