

基于信号特征参数的复杂体制信号 全脉冲数据动态生成技术

杨林, 肖鹏, 秦晖

(中国西南电子设备研究所, 成都 610036)

摘要: 全脉冲数据在电子侦察处理中具有重要价值, 为逼真模拟电子侦察接收机在真实信号环境下接收的全脉冲数据, 提出了一种复杂体制信号的全脉冲数据动态生成技术; 该技术综合考虑了天线方向图、天线扫描方式、空间传输衰减、信号时频特性、信号到达时间、脉冲交错等因素对全脉冲数据产生的影响, 可基于信号特征参数(载频类型、载频变化范围等)动态产生载频捷变、脉冲重复间隔参差等各类复杂体制信号的交错全脉冲数据流; 测试和验证表明, 该技术可适应各类复杂体制信号全脉冲数据流产生, 具有逼真性高、适应性强、可扩展性强的优势。

关键词: 全脉冲、数字模拟、仿真验证

Technology of Full Pulse Data Dynamic Generation in Complicated Signals Based on Signal Characteristic Parameters

YANG Lin, XIAO Peng, QIN Hui

(Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

Abstract: Full pulse data is of great value in electronic reconnaissance processing. A full pulse data dynamic generation technology in complicated signals is put forward to simulate the full pulse data received by the electronic reconnaissance receiver in a real signal environment. This technology considers the influences of antenna pattern, antenna scanning mode, transmission attenuation, signal time-frequency characteristics, signal arrival time, pulse interleaving and other factors on the generation of the full pulse data, the signal characteristic parameters (RF type, RF range, etc.) are used to dynamically generate the full pulse interleaved data flows of various complicated signals, such as RF agility, PRI stagger. The test and verification show that the technology can adapt to the full pulse data flows generation of various complicated signals, which has the advantages of high fidelity, strong adaptability and scalability.

Keywords: full pulse; digital simulation; simulation verification

0 引言

电子战是指使用电磁能和定向能控制电磁频谱或攻击敌军的任何行动, 它包括电子战支援、电子攻击和电子防护三大部分。电子战的目标对象包括雷达、通信、光电、引信、导航、敌我识别、计算机、指挥与控制以及武器制导等所有利用电磁频谱的电子设备, 其目的是从整体上瘫痪敌信息系统和武器控制与制导系统, 进而降低或削弱敌方战斗力并确保己方电子装备的正常工作, 增强己方战斗力。在现代高技术战争中, 电子战已经发展成为一种独立的作战方式, 是不对称战争环境中具有信息威慑能力的主战武器和作战力量之一。局部战争的实践表明, 电子战是现代战争的序幕与先导, 并贯穿于战争的全过程, 进而决定战争的进程和结局。随着科学技术的进步和世界各国对电子战的投入不断增大, 电子战作为现代信息化战争

的主要对象之一, 正以史无前例的速度向前发展, 新技术和新装备不断涌现, 性能水平持续提高, 从而促使电子战的作战领域和作战方式不断变化, 电子战装备的能力也在发生着革命性的变化, 其范围将更广、规模更大、强度更高、进程更激烈^[1]。

目前, 雷达电子战已经成为影响战争胜负的关键因素之一。在雷达电子侦察技术中, 电子侦察设备在电磁环境中侦察的雷达目标信息基本上都是以全脉冲数据的形式进行保存的。由于绝大多数雷达都是脉冲体制雷达^[2], 所以可以用脉冲描述字 (PDW)^[3]来描述雷达发射的每一个脉冲信号。脉冲描述字涵盖了一个脉冲基本的 5 大参数^[4-6]: 脉冲载频 (RF)、脉冲宽度 (PW)、脉冲幅度 (PA)、到达时间 (TOA)、到达方位 (DOA)。电子侦察接收机通过参数测量将雷达脉冲信号的这 5 大参数提取出来, 形成雷达信号全脉冲数据, 用于后续的信号处理与数据处理^[7]。

收稿日期: 2022-07-09; 修回日期: 2022-08-08。

作者简介: 杨林 (1989-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事信号与信息处理、计算机应用方向的研究。

引用格式: 杨林, 肖鹏, 秦晖. 基于信号特征参数的复杂体制信号全脉冲数据动态生成技术[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 240-245, 264.

由于全脉冲数据在电子侦察处理中具有重要价值, 因此, 快速、有效、准确地获取全脉冲数据对电子战研究至关重要。然而, 由于电子对抗装备结构复杂、成本较高、保密性强, 为获取全脉冲数据而进行装备室外试验, 不仅极大地耗费人力物力, 而且易受环境影响, 难以保证数据的有效性与可重现性, 故而采用数字仿真的方式成为了一种可行的路径。雷达信号仿真和电子侦察仿真是电子对抗技术研究中的重要基础手段之一, 可运用于电子对抗技术研究的各个阶段, 具有重要的应用价值, 而在构建雷达信号数字仿真系统和电子侦察数字仿真系统时, 生成全脉冲数据又是数字仿真系统构建的关键环节。

在电子侦察数字仿真中, 一般对雷达信号全脉冲数字仿真建模方式较理想化, 通常忽略了空间传输衰减、天线扫描方式、不同信号脉冲交错等因素对信号的影响, 且对信号特征的描述也比较理想化, 没有描述信号的时、空、频和调制域的全维特征, 无法逼真模拟电子侦察接收机面临的真实信号环境, 从而无法对电子侦察接收处理技术进行更逼真的仿真验证。

本文介绍的全脉冲数字仿真生成技术综合考虑了天线方向图、天线扫描方式^[8]、空间传输衰减、信号时频特性、信号到达时间、脉冲交错等因素对全脉冲信号产生的影响, 能够根据信号特征参数和仿真节拍动态生成全脉冲数据, 使产生的全脉冲数据具有更高的逼真性, 且可适应战场环境可侦察的信号类型仿真。

1 复杂体制信号全脉冲生成技术

1.1 全脉冲生成要素

描述一个全脉冲的信号特征要素主要包括: 脉冲幅度、脉冲载频、脉冲宽度、到达时间、到达方位。为逼真模拟各类复杂体制信号的全脉冲, 需对以下几方面要素进行考虑。

在脉冲幅度方面, 需要考虑天线方向图、天线扫描方式、空间传输衰减对脉冲幅度的影响。

在脉冲载频方面, 需要考虑不同频率类型的信号的对载频产生的影响。

在脉冲宽度方面, 需要考虑不同脉宽类型的信号的对脉冲宽度产生的影响。

在到达时间方面, 需要考虑不同脉冲重复间隔类型的信号对脉冲发射时间间隔的影响, 以及传输距离对到达时间的影响。

在到达方位方面, 需要考虑平台地理位置对相对位置关系的影响。

在最终脉冲形成方面, 需要考虑多个脉冲信号交错到达对最终脉冲数据流的影响。

1.2 总体流程

算法总体流程如图 1 所示, 流程描述如下:

1) 根据设置的仿真节拍和仿真总时间按节拍分批生成全脉冲数据, 直至仿真时间大于等于设置的仿真总时间;

2) 按仿真节拍更新所有信号特征参数信息, 在单次仿真节拍内, 认为信号特征参数信息不再改变;

3) 在单次仿真节拍内, 按照各信号特征参数信息依次模拟各信号全脉冲信息, 包括脉冲幅度、脉冲载频、脉冲宽度、到达时间、到达方位, 直到各信号的本节拍已仿真时间大于等于仿真节拍;

4) 各信号仿真总时间内的全脉冲数据生成完毕后, 将各信号的全脉冲合并后进行脉冲交错处理;

5) 输出全脉冲数据。

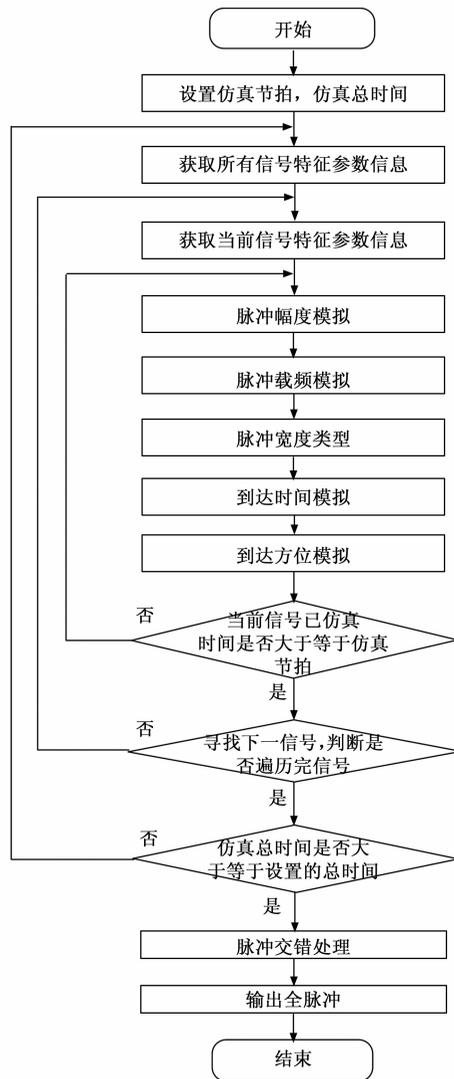


图 1 算法总体流程图

算法中使用的信号主要特征参数定义如表 1 所示。

1.3 脉冲幅度模拟

1.3.1 天线方向图模拟

天线方向图, 是指在离天线一定距离处, 辐射场的相对场强随方向变化的图形。由于天线的辐射场分布在空间, 故完整的天线方向图是通过逐点测量各点辐射特性绘制而成的一个三维的空间图形, 一般工程上取水平面方

向图和垂直面方向图即可。天线方向图一般可表示为如图 2 所示的形式。图中, $\theta_{0.5}$ 表示天线的主瓣宽度, 即天线增益下降到最大增益的一半时 (也即衰减了 3 dB) 的两个增益间的夹角。

表 1 信号主要特征参数定义

数据类型	数据说明
位置信息	该信号与目标地点的位置信息和相对位置信息, 包括该信号发射点的经度、纬度、高度, 目标点的经度、纬度、高度, 信号与目标的相对方位、相对俯仰、相对距离, 以及目标与该信号波束中心指向的相对方位、相对俯仰、相对距离等。
扫描信息	该信号的扫描相关信息, 包括扫描类型 (跟踪、扇扫、圆扫)、扫描速度、扫描周期、扫描范围等。
天线方向图信息	天线方向图类型, 主瓣宽度、信号 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的天线增益等。
载频信息	包括载频类型、载频变化范围、各载频值等。
脉冲重复间隔信息	包括脉冲重复间隔类型、脉冲重复间隔变化范围、各脉冲重复间隔值等。
脉宽信息	包括脉宽类型、各脉宽值等。
发射功率信息	该信号的发射功率。

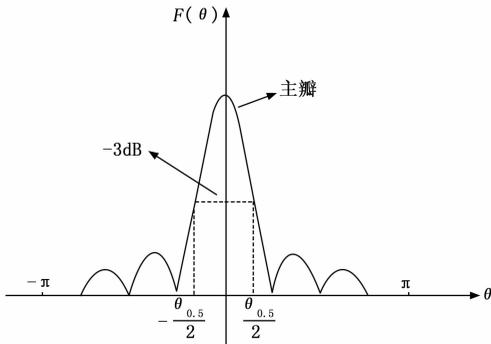


图 2 天线方向图一般表示形式

为逼真模拟目标信号在各辐射方向上的幅度变化, 需对目标雷达天线方向图进行建模, 建模方式可通过理论公式进行推导, 也可通过实测数据进行导入, 以形成全空域的方向图数据^[9-10]。在以理论公式进行推导的方式下, 以辛格函数^[11-13]类型的天线方向图为例, 假设信号 ID 为 i ($i = 0, 1, \dots$) 的雷达信号的主瓣波束宽度为 $Width_{i,main}$ ($^\circ$), 主瓣增益在 0° 时取得最大值 0 (dB), 主瓣外相对主瓣增益最大值的增益为 $Gain_{i,other}$ (d, B), 可得信号 i 在 k° ($0^\circ \sim 180^\circ$) 的信号增益 $Gain_{i,k}$ (dB) 模拟如下:

$$Gain_{i,k} =$$

$$\begin{cases} 0 & \text{当 } k = 0 \\ 20 * \lg(\sin(\frac{2.78 * k}{Width_{i,main}}) / \frac{2.78 * k}{Width_{i,main}}) & \text{当 } k \leq Width_{i,main} \\ Gain_{i,other} & \text{当 } k \text{ 为其他} \end{cases}$$

(1)

1.3.2 天线扫描方式模拟

雷达在不同工作任务和工作模式下, 采用的扫描方式完全不同。由于天线扫描方式的不同, 在不同时刻到达同一目标地点的脉冲幅度差异可能会非常巨大, 为将此差异体现出来, 需对天线扫描方式进行模拟。天线扫描方式一般分为跟踪、圆扫、扇扫^[14], 跟踪指天线朝向某一目标进行跟踪, 圆扫指天线在整个圆周上进行目标探测, 扇扫指天线在指定范围内进行扇形扫描。假设初始时刻信号 i 的发射天线主瓣朝向相对自身平台朝向的相对角为 Az_i ($^\circ$), 扫描速度为 $Speed_i$ ($^\circ/\mu s$), 扫描方向为 Dir_i (顺时针为 1, 逆时针为 -1), 信号 i 的第 j 个脉冲的脉冲重复间隔为 $PRI_{i,j}$ (μs), 则在信号 i 发射第 j 个脉冲时其主瓣朝向与自身平台朝向的相对角 $Az_{i,j}$ ($^\circ$) 可表示为:

$$Az_{i,j} =$$

$$\begin{cases} Az_i & \text{当 } j = 0 \\ ((Az_{i,j-1} + Speed_i * PRI_{i,j-1} * Dir_i) \% 360 + 360) \% 360 & \text{当 } j > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, 当天线扫描方式为跟踪时, 扫描速度为 0; 当天线扫描方式为扇扫时, 每当天线扫描到边界范围时, 都需改变扫描方向。

假设初始时刻目标点相对于信号 i 平台朝向的相对角为 $RelaAz_i$ ($^\circ$), 则在信号 i 发射第 j 个脉冲时其主瓣朝向与目标点的相对角 $RelaAz_{i,j}$ ($^\circ$) 可表示为:

$$RelaAz_{i,j} = |Az_{i,j} - RelaAz_i| \quad (3)$$

1.3.3 空间传输衰减模拟

除了天线扫描引起的幅度变化, 信号在传输过程受传输路径天气影响造成的功率衰减^[15]也是需要重点考虑的因素。在此, 本方法考虑了理想情况下的自由空间传播和较低频率下的近地传播 2 种情况, 并综合气候因素计算空间传输衰减。

由于理想的无线传播条件是不存在的, 一般认为传播路径上没有障碍物阻挡, 到达接收天线的地面反射信号场强也可以忽略不计, 在这样的情况下, 电波的传播方式就被认为是在自由空间传播。因此, 自由空间传播适用于没有太大反射路径的传播, 这种情况一般出现在高频和高空。在自由空间传播的情况下, 假设信号 i 的雷达信号的载频中心值为 $RF_{i,mark}$ (MHz), 发射地点与目标地点的相对距离为 D_i (km), 则空间传输衰减 L_i (dB) 可表示为:

$$L_i = 32.44 + 20\lg(RF_{i,mark}) + 20\lg(D_i) \quad (4)$$

若信号频率较低且传输接近地面, 一般来说, 信号经过了地球的一次反射, 这种情况下, 可利用双线传播公式进行计算。假设信号 i 的发射高度为 $h_{i,t}$ (m), 目标点的接收高度为 h_r (m), 则空间传输衰减 L_i (dB) 可表示为:

$$L_i = 120 + 40\lg(D_i) - 20\lg(h_{i,t}) - 20\lg(h_r) \quad (5)$$

至于如何选择使用哪种计算方法, 则通过计算菲涅尔区 (FZ)^[16]来确定: 如果相对距离小于 FZ, 则采用自由空间传播公式, 否则采用双线传播公式。信号 i 的菲涅尔区 FZ_i (km) 计算公式如下:

$$FZ_i = (h_{i,t} * h_r * RF_{i,mark}) / 24\ 000 \quad (6)$$

对于天气对信号幅度的影响, 主要考虑下雨情况下对信号的衰减, 采用查表的方式对不同降雨量的衰减进行叠加, 所用数据图表如图 3 所示。

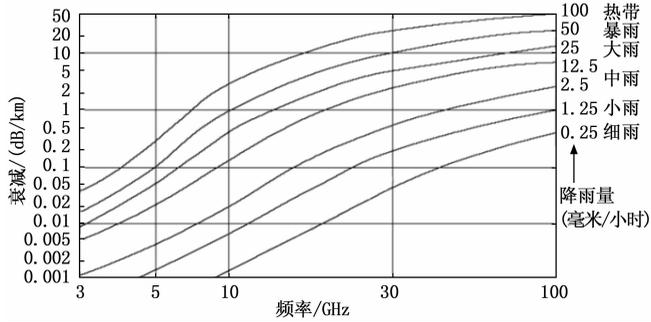


图 3 降雨量对信号衰减的影响

假设由查表得到降雨量对信号 i 造成的衰减为 $L2_i$ (dB), 则总的传输衰减 $L_{i,trans}$ (dB) 可表示为:

$$L_{i,trans} = L_i + L2_i \quad (7)$$

1.3.4 脉冲幅度模拟

经天线方向图模拟、天线扫描方式模拟、空间传输衰减模拟后, 假设信号 i 的发射功率为 PA_i (dBm), 则信号 i 的第 j 个脉冲的到达目标点的幅度值 $PA_{i,j}$ (dBm) 可模拟为:

$$PA_{i,j} = PA_i + Gain_{i,RelAz_{i,j}} - L_{i,trans} \quad (8)$$

1.4 脉冲载频模拟

在脉冲载频模拟上, 主要考虑脉冲载频调制类型对信号载波频率的影响。脉冲载频调制类型主要包括频率固定、频率捷变、频率分集、连续波。

- 1) 频率固定信号: 指频率不发生改变的信号;
- 2) 频率捷变信号: 指频率在一定频带范围内快速变化的信号;

3) 频率分集信号: 也可称多载频信号, 具有多个不同的载频, 根据发射时间间隔的不同, 又可分为同时频率分集和分时频率分集, 同时频率分集指多个载频在同一时间发射, 分时频率分集指多个载频之间间隔一定时间逐一发射;

4) 连续波信号: 指连续发射电磁波的信号, 其频率特性与频率固定信号相同, 区别在于连续波信号是持续发射的, 而率固定信号是以脉冲的形式发射的。

对于脉冲载频的模拟, 可通过理论公式对脉冲载频直接进行模拟^[17-19]。假设信号 i 的雷达信号的载频中心值为 $RF_{i,mark}$ (MHz), 载频变化范围为 $RF_{i,range}$ (MHz), 载频个数为 $RF_{i,num}$, 各载频值 (分集时使用) 为 $RF_{i,value[Num]}$ (MHz, $Num=0, 1, \dots, RF_{i,num}-1$), 调频带宽为 $RF_{i,band}$ (MHz), 以捷变信号为例, 信号 i 的第 j 个脉冲的载频值 $RF_{i,j}$ (MHz) 模拟如下:

$$RF_{i,j} = RF_{i,mark} + RF_{i,range} * \text{rand}(-1,1) \quad (9)$$

1.5 脉冲宽度模拟

在脉冲宽度模拟上, 主要考虑脉冲宽度调制类型对信

号脉冲宽度的影响。脉冲宽度调制类型主要包括脉宽固定、多脉宽。

- 1) 脉宽固定信号: 指脉宽不发生改变的信号;
- 2) 多脉宽信号: 指具有多个脉宽的信号。

对于脉冲宽度的模拟, 可通过理论公式对脉冲宽度进行模拟, 但根据接收机的工作原理, 在脉冲载频为连续波的情况下, 需按照接收机工作时的连续波切割脉宽对连续波信号进行切割形成脉宽参数。假设信号 i 的雷达信号的脉宽中心值为 $PW_{i,mark}$ (μs), 脉宽个数为 $PW_{i,num}$, 各脉宽值 (多脉宽时使用) 为 $PW_{i,value[Num]}$ (μs , $Num=0, 1, \dots, PW_{i,num}-1$), 连续波切割脉宽为 $PW_{i,cut}$ (μs), 以多脉宽为例, 信号 i 的第 j 个脉冲的脉宽 $PW_{i,j}$ (μs) 模拟如下:

频率分集:

$$PW_{i,j} = PW_{i,value[j \% RF_{i,num}]} PW_{i,num} \quad (10)$$

其它:

$$PW_{i,j} = PW_{i,value[j \% PW_{i,num}]} \quad (11)$$

1.6 到达时间模拟

1.6.1 脉冲重复间隔模拟

在脉冲重复间隔模拟上, 主要考虑脉冲重复间隔调制类型对信号脉冲重复间隔的影响。脉冲重复间隔调制类型主要包括脉冲重复间隔固定、脉冲重复间隔抖动、脉冲重复间隔参差、脉冲重复间隔滑变、脉冲重复间隔跳变:

- 1) 脉冲重复间隔固定信号: 指脉冲重复间隔不发生改变的信号;
- 2) 脉冲重复间隔抖动: 指相邻脉冲重复间隔在一定数值范围内快速变化的信号;
- 3) 脉冲重复间隔参差: 指各脉冲之间按照设定的脉冲重复间隔顺序变化的信号;
- 4) 脉冲重复间隔滑变: 指脉冲重复间隔在一定范围内按照一定规律进行平滑变化的信号;
- 5) 脉冲重复间隔跳变: 指脉冲重复间隔在设定的多个脉冲重复间隔中随机变化的信号。

对于脉冲重复间隔的模拟, 可通过理论公式对脉冲重复间隔进行模拟, 但根据接收机的工作原理, 在脉冲载频为连续波的情况下, 需按照接收机工作时的连续波切割周期对连续波信号进行切割形成脉冲重复间隔参数。假设信号 i 的雷达信号的脉冲重复间隔中心值为 $PRI_{i,mark}$ (μs), 脉冲重复间隔变化范围为 $PRI_{i,range}$ (μs), 脉冲重复间隔个数为 $PRI_{i,num}$, 各脉冲重复间隔值 (跳变、参差、滑变时使用) 为 $PRI_{i,value[Num]}$ (μs , $Num=0, 1, \dots, PRI_{i,num}-1$), 滑变步进为 $PRI_{i,step}$ (μs), 连续波切割周期为 $PRI_{i,cut}$ (μs), 以重频抖动信号为例, 信号 i 的第 j 个脉冲的脉冲重复间隔值 $PRI_{i,j}$ (μs) 模拟如下:

频率分集:

$$PRI_{i,j} = \begin{cases} PRI_{i,range} * \text{rand}(-1,1) + \\ PRI_{i,mark}, & \text{当 } j \% RF_{i,num} \text{ 为 } 0 \\ PRI_{i,j-1}, & \text{当 } j \% RF_{i,num} \text{ 不为 } 0 \end{cases} \quad (12)$$

其它:

$$PRI_{i,j} = PRI_{i,mark} = PRI_{i,range} * rand(-1,1) \quad (13)$$

1.6.2 到达时间模拟

由于雷达信号脉冲从发射到该脉冲达到目标地点需要时间传播,为模拟信号脉冲抵达不同地点的到达时间,需根据信号发射地点和目标地点的相对位置关系,将传输时间叠加到信号到达时间,以实现脉冲到达时间的精确模拟。

电磁波在空气中传播速度为光速 c (m/s),假设根据平台位置信息计算出信号 i 的发射地点与目标地点的相对距离为 D_i (km),则传输时间 $TransTime_i$ (μs) = $10^9 * D_i/c$,以频率分集信号为例,假设分时分集的发射间隔时间为 $IntervalTime_i$ (μs),则信号 i 的第 j 个脉冲的到达时间 $TOA_{i,j}$ (μs) 模拟如下:

$$TOA_{i,j} = \begin{cases} TransTime_i + IntervalTime_i * j, & \text{当 } j \leq RF_{i,mm} - 1 \\ TOA_{i,j-RF_{i,mm}} + PRI_{i,j-RF_{i,mm}}, & \text{当 } j > RF_{i,mm} - 1 \end{cases} \quad (14)$$

1.7 到达方位模拟

在到达方位模拟方面,可通过信号特征参数中的地理位置信息进行计算得出信号到达方位。由于单次仿真节拍很小(一般为 μs 级或 ms 级),平台的物理运动参数在这样的节拍内一般可认为保持不变,故单次仿真节拍内脉冲到达方位(DOA)可认为保持不变,故假设信号 i 的雷达信号的到达方位为 DOA_i ($^\circ$),则信号 i 的第 j 个脉冲的到达方位 $DOA_{i,j}$ ($^\circ$) = DOA_i 。

1.8 脉冲交错处理

通过 1.3~1.7 中的脉冲幅度模拟、脉冲载频模拟、脉冲宽度模拟、到达时间模拟、到达方位模拟,各单独信号的全脉冲数据的五大参数已全部生成,现在只需将各信号脉冲进行交错处理和排序^[20]即可,也即根据到达时间将所有单独信号的脉冲数据进行整合,从而形成最终的全脉冲数据流。

2 仿真与验证

基于本算法,结合某项目开发的场景仿真推演软件(用于提供信号参数输入),对本文提出的复杂体制信号全脉冲生成技术进行仿真和测试,测试用主要信号数据如表 2 所示。

对依赖上述模型动态生成的全脉冲数据进行验证分析,信号各特征维度的结果如下。

1) 信号的扫描特征模拟:信号 1 产生的跟踪、圆扫、扇扫全脉冲到达时间-幅度关系如图 4、图 5、图 6 所示。可以看出:跟踪情况下脉冲幅度保持不变,圆扫情况下每个幅度峰值之间的间隔为 5 s,扇扫情况下每 2 个幅度峰值之间的间隔为 5 s,符合跟踪、圆扫、扇扫的全脉冲幅度变化规则。

2) 信号载频特征模拟分析:信号 2 (捷变)、信号 3 (分集)产生的全脉冲到达时间-载频关系如图 7、图 8 所示。可以看出,信号 2 (捷变)的载频随机分布在 7 700~

表 2 信号参数表

参数名称	载频类型	载频值/MHz	重频类型	重频值/ μs	脉宽类型	脉宽值/ μs	扫描类型	扫描时间/s
信号 1	固定	8 000	固定	1 000	固定	30	跟踪 圆扫 扇扫	/ 5 5
信号 2	捷变	7 700 ~ 8 300	固定	1 000	固定	30	跟踪	/
信号 3	分集	7 500 8 000 8 500 9 000 分时间 间隔 50 μs	固定	1 000	固定	30	跟踪	/
信号 4	固定	8 000	参差	1 000 500 2 000 3 000	固定	30	跟踪	/
信号 5	固定	8 000	滑变	900 ~ 1 100	固定	30	跟踪	/
信号 6	固定	8 000	固定	1 000	双脉宽	30 80	跟踪	/
信号 7	捷变	7 700 ~ 8 300	参差	1 000 500 2 000 3 000	固定	30	跟踪	/
信号 8	固定	4 000	固定	3 500	固定	300	跟踪	/
信号 9	固定	8 000	固定	1 000	固定	100	跟踪	/
信号 10	固定	10 000	固定	300	固定	30	跟踪	/

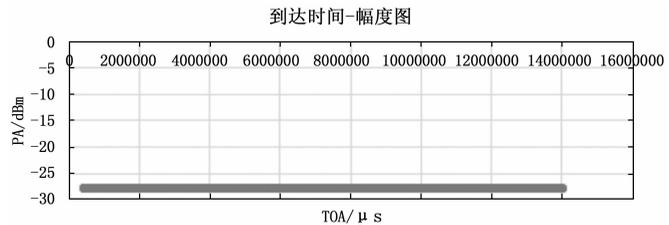


图 4 跟踪情况下到达时间-幅度图

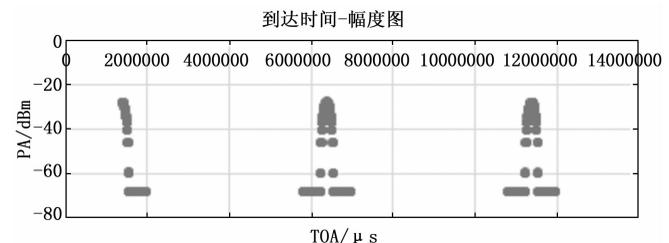


图 5 圆扫情况下到达时间-幅度图

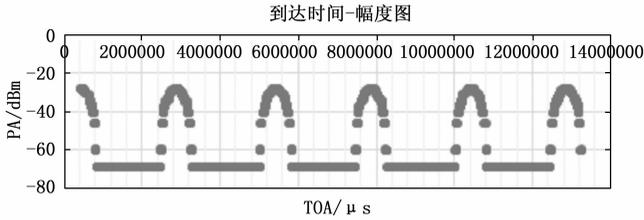


图 6 扇扫情况下到达时间-幅度图

8 300 MHz 之间,符合捷变规则;信号 3(分集)的载频按照 50 μs 的发射间隔发出,且按照 1 000 μs 的脉冲重复间隔周期出现,符合分集规则。

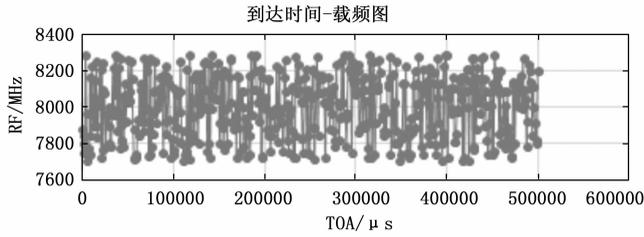


图 7 信号 2(捷变)到达时间-载频图

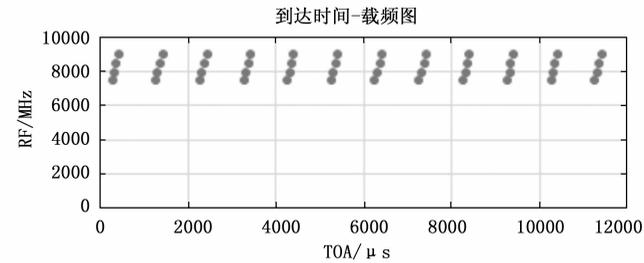


图 8 信号 3(分集)到达时间-载频图

3) 信号脉冲重复间隔特征模拟:信号 4(参差)、信号 5(滑变)产生的全脉冲脉冲序号-脉冲重复间隔关系如图 9、图 10 所示。可以看出,信号 4(参差)的脉冲重复间隔按照 1 000 μs、500 μs、2 000 μs、3 000 μs 的顺序周期出现,符合参差规则;信号 5(滑变)的脉冲重复间隔按照 900~1 100 μs 均匀出现,符合滑变规则。

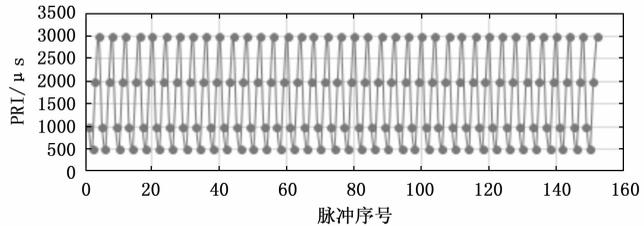


图 9 信号 4(参差)脉冲序号-脉冲重复间隔图

4) 信号脉宽特征模拟:信号 6(双脉宽)产生的全脉冲到达时间-脉宽关系如图 11 所示。可以看出,产生的脉宽为 30 μs、80 μs 顺序出现,符合双脉宽规则。

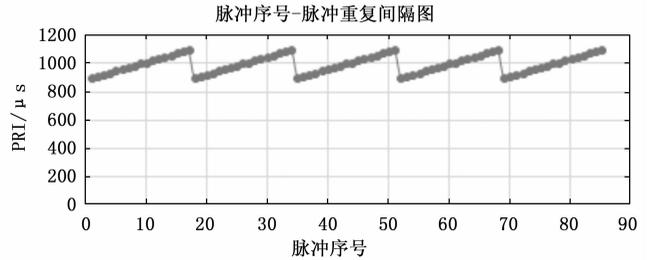


图 10 信号 5(滑变)脉冲序号-脉冲重复间隔图

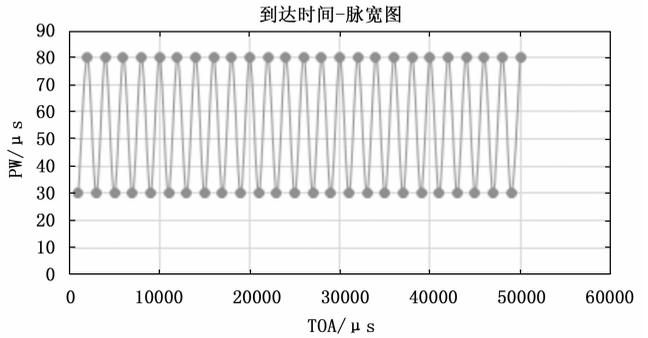


图 11 信号 6(双脉宽)到达时间-脉宽图

重复间隔参差)产生的全脉冲载频-脉冲重复间隔关系如图 12 所示。可以看出,产生的载频随机分布在 7 700~8 300 MHz 之间,产生的脉冲重复间隔为 1 000 μs、500 μs、2 000 μs、3 000 μs,符合载频捷变与脉冲重复间隔参差规则。

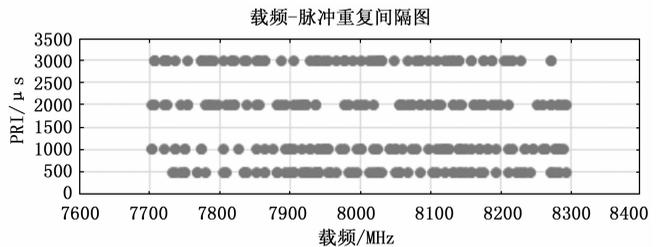


图 12 信号 7(载频捷变、脉冲重复间隔参差)

载频-脉冲重复间隔图

6) 多信号特征模拟:信号 8、信号 9、信号 10 共同产生的全脉冲到达时间-载频关系如图 13 所示。可以看出,产生的全脉冲到达时间按照各自的脉冲重复间隔有序排列,符合脉冲交错排序规则。

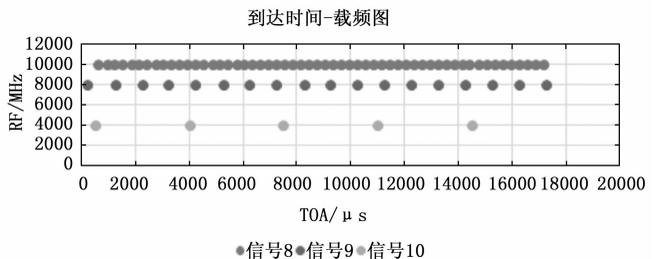


图 13 信号 8、信号 9、信号 10 到达时间-载频图

5) 信号时频双变特征模拟:信号 7(载频捷变、脉冲

(下转第 264 页)