

一种兼容型空基区域导航增强脉冲信号设计

周天润¹, 王振岭¹, 徐胜良², 刘亚廷³

(1. 中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军 第 32380 部队, 北京 100072;

3. 火箭军装备部 驻廊坊地区军事代表室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 空基区域导航增强系统是一种卫星导航系统的有效辅助与补充手段, 其信号设计是影响增强定位精度的重要因素; 针对系统对导航卫星辅助增强与独立定位的需求, 以北斗系统为应用背景, 给出了一种能够与北斗卫星信号兼容的区域增强信号设计建议; 根据兼容性需求分析结果, 对频点、扩频码与电文格式等进行了选择和设计; 针对增强系统中可能存在的远近效应, 提出了脉冲调制的优化方式, 根据信号参数设计适用于空基区域增强信号的脉冲信号占空比, 并设计相适应的脉冲图案; 仿真结果表明, 采用脉冲信号形式的区域增强信号能够与北斗卫星信号实现兼容, 卫星信号比区域增强信号弱 30 dB 时能够正常捕获, 减弱远近效应的影响。

关键词: 区域导航增强; 信号设计; 远近效应; 脉冲调制; 增强载荷

Design of Compatible Pulse Signal for Aircraft-Based Regional Navigation Augmentation

ZHOU Tianrun¹, WANG Zhenling¹, XU Shengliang², LIU Yating³

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

2. Unit 32380 of PLA, Beijing 100072, China;

3. Langfang District Military Representative Office, Rocket Force Equipment Department of PLA,

Langfang 065000, China)

Abstract: Aircraft-based regional navigation augmentation system is an effective auxiliary and supplementary means for satellite navigation systems, and its signal design is an important factor influencing the accuracy of augmentation positioning. To address this issue, based on the application background of the Beidou system, a regional augmentation signal design compatible with the Beidou satellite signal is presented. According to the requirement of compatibility analysis, the carrier frequency, spread spectrum codes, and navigation message formats are carefully selected and designed. In terms of the potential near-far effect in the augmentation system, an optimization method for pulse modulation is proposed. The duty cycle of pulse signal suitable for enhancing signals in the spatial region is designed based on the signal parameters, and the corresponding pulse pattern is developed. Simulation results demonstrate that the pulse regional augmentation signal is compatible with the Beidou satellite signal. Furthermore, when the satellite signal is 30 dB weaker than the regional augmentation signal, it can be captured normally and the impact of the near-far effect is reduced.

Keywords: regional navigation augmentation; signal design; far-near effect; pulse modulation; augmentation payload

0 引言

全球卫星导航系统 (GNSS, global navigation satellite system) 已经在各个领域发挥了重大作用, 但同时

卫星导航系统有着难以避免的局限性, 如落地电平较低, 抗干扰性能较差, 在信号遮挡严重的环境下难以满足连续的高精度定位^[1]。空基区域导航增强系统由搭载于无人机等空中平台的增强载荷组成, 播发与卫星导航

收稿日期:2024-09-24; 修回日期:2024-10-26。

作者简介:周天润(2000-),男,硕士研究生。

通讯作者:王振岭(1975-),男,硕士,研究员,硕士生导师。

引用格式:周天润,王振岭,徐胜良,等. 一种兼容型空基区域导航增强脉冲信号设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 254-261.

信号类似的区域导航区域增强信号并提供更强的信号功率^[2],能够应用于信号遮蔽条件的山区应急救援区域导航、卫星受干扰乃至拒止情况下的军事导航定位授时等领域。

空基区域导航增强系统中将增强载荷搭载于空中平台,如气球、有人或无人机,通常不受地域限制并可灵活部署于需要增强的服务区域上空,并通常可工作于辅助增强定位独立导航定位两种模式。空基区域增强的空基载荷本质上是增加了支持定位的“卫星”,因此系统定位原理与卫星导航系统相同,均采用伪距定位原理^[3],但区域增强信号的传输路径、信道特性与卫星导航信号存在着显著差异,并且会产生严重的远近效应干扰^[4],即区域增强信号功率过大遮蔽卫星导航信号,因此需要针对区域增强系统设计合适的信号。区域增强信号通常在频点、扩频码选择等方面与卫星信号相同,从而保证用户接收机仅需要软件适应性升级即可接受区域增强信号^[5]。在信号发射层面抑制远近效应的解决方法通常有信号发射方式、信号体制设计等^[6],主要包括跳频信号^[7]、双重信号发射^[8]等技术,但都需要接收机做额外的硬件改动,无法兼容北斗卫星信号。

脉冲调制基于时分多址(TDMA, time division multi-access)技术的原理^[9],将一个周期的区域增强信号分为多个周期的脉冲信号传送,作为一种在信号发射层抑制远近效应的方法,目前在伪卫星设计中应用最为广泛^[6]。目前通用的两种脉冲发射模式由 RTCM^[10]和 RTCA^[11]制定,分别使用 10% 和 2.7% 的脉冲占空比来适配 GPS-C/A 码与 GPS-P 码。文献[12]针对 Galileo 伪卫星系统设计了一种脉冲优化方案,并利用移位寄存器确定脉冲位置。文献[13]认为为了满足伪卫星多址访问的需要,Galileo E1 频点的最大占空比为 3.8%。考虑到区域增强系统与北斗卫星信号的兼容性,尤其是测距码的结构与 GPS 和 Galileo 不同,以上文献提出的方案都不适用。文献[14]提出一种通用的脉冲设计方法,采用随机脉冲图案,能够适用于任何信号体制和占空比,但不同伪卫星信号之间碰撞概率较大。

针对空基区域增强系统的原理与特点,设计一套与北斗卫星系统兼容的区域增强信号,通过部署在空中平台的增强载荷系统发射导航定位信号,完成增强系统独立定位于卫星导航辅助定位的功能。区域增强信号采用与北斗卫星相同频点与扩频码,实现与北斗卫星信号兼容;建立空基区域增强系统的布局与服务范围,分析区域增强系统中存在的远近效应;针对北斗 B1I 信号的特性,提出一种新的脉冲调制信号方案,该方案确定了脉冲信号的占空比并设计了相应的脉冲图案。对增强系统的连续信号和脉冲信号进行了分析,验证该脉冲信号能

够削弱远近效应问题,同时用户接收机只需要在软件层面进行改造即可接收区域增强信号。在满足区域导航增强功能的同时,又能够兼容卫星导航系统,具有兼容性和普适性。

1 空基区域增强系统工作原理

1.1 系统结构和工作方式

基本的空基区域增强系统由 4 套搭载于空中平台的增强载荷组成,空中平台位置经过布局优化后,能够使地面指定服务区域内获得良好定位精度,如图 1 所示。

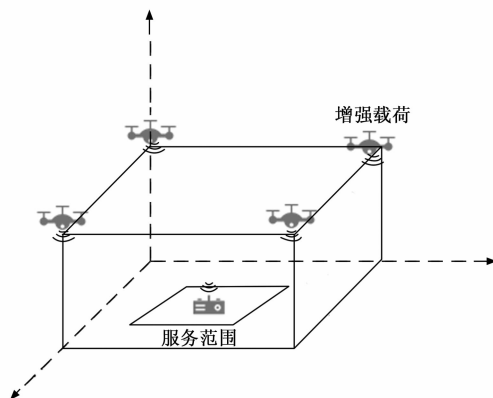


图1 空基区域增强系统结构图

与 GNSS 信号类似,区域增强信号同样采用码分多址(CDMA, code division multi-access)技术,实现与 GNSS 信号兼容和互操作。根据指定服务区域不同,区域增强系统工作模式分为 GNSS 辅助增强模式与独立定位模式。

1.2 服务范围

空基区域导航增强主要通过功率增强的方式实现,一般区域导航增强的应用场景所需的区域增强信号强度比北斗卫星信号高约 30 dB。为实现服务范围和信号强度的要求,需要对增强信号的传播链路进行核算。自由空间损耗是指电磁波在传输路径中的衰减,如式(1)所示:

$$L_{bf} = 32.45 + 20\lg(f_{\text{MHz}}) + 20\lg(d_{\text{km}}) \quad (1)$$

为确保增强系统相对北斗导航系统的抗干扰改善度提升约 30 dB,考虑到北斗 B1I 频点导航信号的落地电平约 -133 dBm^[15],则到达用户接收机的区域增强信号电平应当不低于 -100 dBm。假设空中平台飞行高度为 3 km,要求每个增强载荷覆盖半径不小于 10 km,可计算出自由空间损耗 L_{bf} 约为 116.4 dB,如图 2 所示。

为了满足覆盖区域内区域增强信号平均功率不小于 -100 dBm,另外在发射端增加 5 dB 裕量,则发射端的输出功率等于 $-100 + 116.3 + 5 = 21.3 \text{ dBm} < 1 \text{ W}$ 。因此,在发射连续信号的情况下,发射端输出功率不小于 1 W 即可满足约 100 km² 目标区域覆盖。

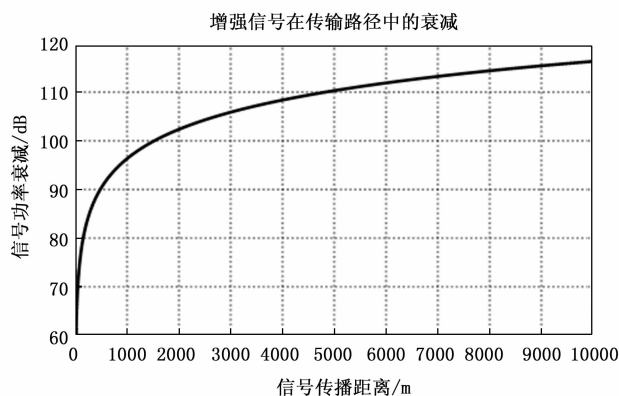


图 2 区域增强信号在传输路径中的衰减

1.3 远近效应干扰分析

与北斗卫星相比,空基平台与用户接收机的距离近得多,接收机接收区域增强信号的功率幅度较大,会产生远近效应问题,压制卫星信号导致无法正常捕获。当空基平台与接收机之间距离过近时,区域增强信号功率很大,会对北斗卫星信号造成压制干扰,接收机无法正常跟踪北斗卫星信号;当距离较远时,区域增强信号衰减较大,功率过小导致接收机无法跟踪,如图 3 所示。

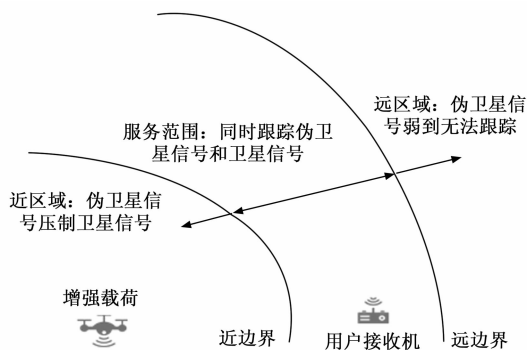


图 3 空基区域增强系统远近效应示意图

假设可见卫星定位信号的数量为 N , 将噪声信号简化, 则用户接收机接收到的第 j 颗星的中频信号 $S_{IF}(t)$ 可表示为:

$$S_{IF}(t) = \sum_{j=1}^N y^{(j)}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2P^{(j)}} C^{(j)}(t - \tau^{(j)}) \cdot D^{(j)}(t - \tau^{(j)}) \cos(2\pi f_d^{(j)} t + \varphi^{(j)}) \quad (2)$$

式中, P 为接收信号功率, f_d 为多普勒频移, τ 为伪码相位, φ 为载波相位。捕获信号时, $S_{IF}(t)$ 首先和本地载波进行混频, 剥离中频载波信号后将本地产生的伪码信号与其进行相关运算, 可得到第 j 颗星信号 $y^{(j)}(t)$ 的相干积分值 $I^{(j)}(n)$, 表示卫星信号的自相关结果。在对第 j 颗星进行捕获时, 接收机中的总相关积分值可表示为:

$$I(n) = I^{(j)}(n) + \sum_{k=1, k \neq j}^N I^{(k)}(n) \quad (3)$$

其中: $I^{(jk)}(n)$ 表示区域增强信号与所捕获的卫星信号互相关积分结果, 可表示为:

$$I^{(jk)}(n) = \sqrt{2P^{(k)}} R_{jk}(\tau_e^{(j)} + \tau^{(jk)}) D^{(k)}(n + \tau^{(jk)}) \cdot \text{sinc}\{[f_e^{(j)} + f_d^{(jk)}] T_{\text{coh}}\} \cos(\bar{\omega}_e^{(jk)}) \quad (4)$$

式中, T_{coh} 表示相干积分时间。当 $P^{(k)} \gg P^{(j)}$, 此时区域增强信号与卫星信号的互相关积分值将会大于卫星信号的自相关积分值, 造成自相关峰被互相关峰掩盖, 接收机无法准确检测出自相关峰, 从而导致卫星信号捕获失败。当接收机过于靠近空中平台 k 附近, 由于远近效应, 此时接收机处于近区域, 区域增强信号功率较大, 对卫星信号产生干扰。

2 空基区域增强信号设计

根据上述对空基区域导航增强信号工作原理及面对的远近效应干扰问题分析, 在信号设计方面需要考虑与北斗卫星信号的兼容性与抗远近效应的性能。首先考虑在连续信号下与北斗 B1I 频点信号相同格式的选择和性能分析, 在信号格式确定的基础上再进行脉冲调制方式的设计, 以达到减弱远近效应的目的。

2.1 信号模型

为了最大限度地保证与现有用户终端的兼容使用, 降低用户终端的改造成本, 空基区域增强信号采用与北斗卫星相同的信号体制。

与北斗 B1 频点 I 支路的信号相同, 区域增强信号同样由“电文+扩频码+载波”构成, 第 j 号增强载荷的信号表达式如下:

$$S^j(t) = A^j C^j(t) D^j(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi^j) \quad (5)$$

式中, A^j 为信号幅度, C^j 为扩频码, $D^j(t)$ 为电文, f_c 为载波中心频率, φ^j 为载波初始相位。如图 4 所示, 主要包含 3 个层次, D1 导航电文用于传递数据信息, 速率为 50 bps; 扩频码是一组伪随机序列 (PRN, pseudo-random number), 用来实现码分多址和测距, 速率为 2.046 Mcps; 导航电文与扩频码调制后依附在高频载波上, 其频率为 1 561.098 MHz; 采用 QPSK 调制技术。

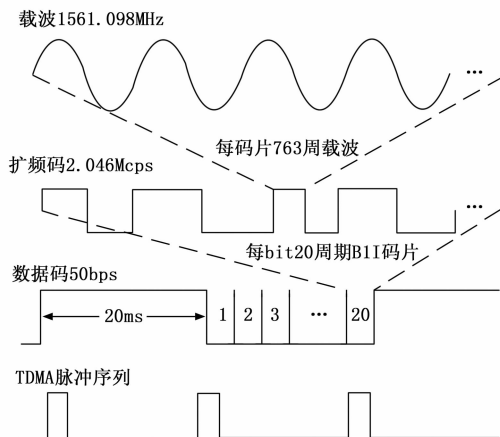


图 4 空基区域增强信号结构示意图

2.2 扩频码选择与性能分析

与北斗 B1I 信号的扩频码相同, 区域增强信号采用码长为 2 046 的 C/A 码, 由两个 11 级 m 序列模 2 和产生的平衡 C/A 码截短 1 bit 生成, 如图 5 所示, 其初相均为 01010101010。由于北斗卫星选择了 37 中 2 抽头组合, 区域增强信号从剩余的 38~63 号三抽头的测距码中选用。

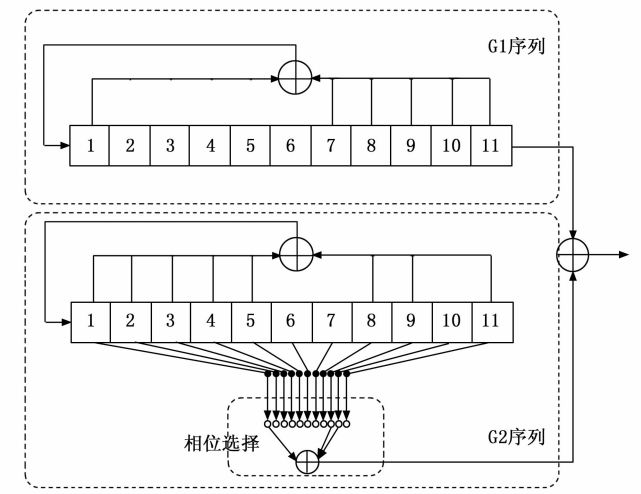


图 5 B1I 信号扩频码生成器

C/A 码具有良好的自相关特性和互相关特性, 分别反映了码序列 $x(n)$ 与自身或另一个 C/A 延迟 k 码片后得到序列 $x(n-k)$ 的相关程度, 其计算公式为:

$$R_x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)x(k-n) \tag{6}$$

$$R_{x_1x_2}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_1(k)x_2(k-n) \tag{7}$$

图 6 表示 52 号卫星 C/A 码自相关波形以及 52 号卫星与 53 号卫星 C/A 码的互相关波形。

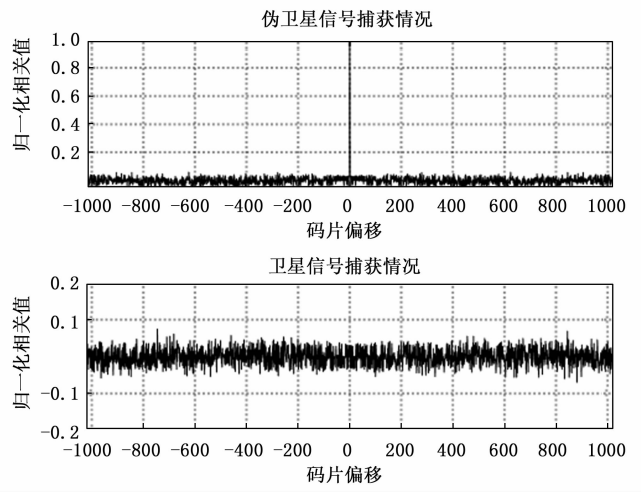


图 6 C/A 码的自相关和互相关特性

其互相关峰的最大值相对于最大自相关尖峰值的比

率为:

$$10\lg \left(\frac{65}{\frac{2\,046}{1}} \right)^2 \approx -30\text{ dB} \tag{8}$$

此比率为不同 C/A 码之间的最大隔离度。这 30 dB 隔离度能够减少不同 C/A 码之间相互干扰, 提高接收机对不同卫星信号的识别率。

2.3 导航电文格式设计

D1 导航电文是 B1I 信号的第一个层次, 如图 7 所示。对于空基区域增强信号, 可以删除其冗余部分以定位适用于区域增强信号的电文^[16], 其中帧同步码和子帧计数都予以保留; 子帧 4 和子帧 5 中有关卫星历书参数的字置 0, 子帧 1 中有关电离层参数的字置 0; 子帧 2、子帧 3 中卫星星历参数部分删除, 空出的位置用于传输区域增强信号发射机的三维位置坐标等参数, 其中 X、Y、Z 坐标分别占 24 bit。

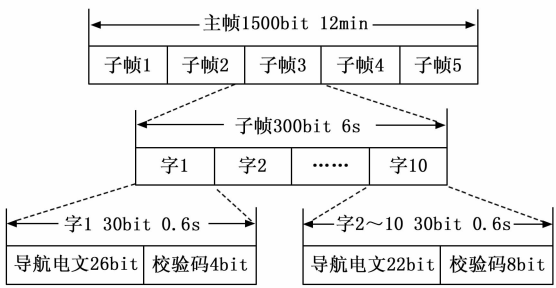


图 7 区域增强信号导航电文帧结构

3 脉冲信号设计

脉冲调制技术利用占空比较低的短脉冲来传送区域增强信号, 以占空比 10% 为例, 增强载荷只在 10% 时间内发射信号, 其余 90% 时间内静默, 因此其对卫星信号的干扰只存在于这 10% 时间内, 其余时间接收机可正常接收卫星信号, 实现区域增强信号和卫星信号更好的兼容, 并减弱远近效应^[17-18]。

脉冲调制方案的设计可以分为两步: 根据扩频码选择合适的占空比; 按照占空比与增强载荷数量设计脉冲图案。可以按照以下要求进行脉冲信号设计^[19]:

1) 脉冲信号的干扰与占空比成正比, 占空比越低对卫星信号的干扰越小, 同时也可使系统容纳更多增强载荷以提升定位精度;

2) 为了保证扩频码的自相关性, 需要保证脉冲调制方案为一个统一占空比方案^[20];

3) 由于区域增强系统工作时需要多个载荷同时发送信号, 为保证多址性能应要求每个增强载荷都有不同的脉冲图案。

3.1 脉冲占空比设计

对于北斗卫星信号, 区域增强信号作为一种干扰信

号与热噪声叠加在一起，会减小北斗卫星信号的平均信干比 (dB)^[7]，即：

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{avg}} = \frac{S}{I+P} \tag{9}$$

式中， S 为北斗卫星信号的功率， I 为来自于其他卫星信号的干扰和热噪声， P 为区域增强信号的干扰。由公式可知，区域增强信号的脉冲占空比增大会导致北斗卫星信号的平均信干比减小。假定接收机积分时间为一个码周期，仅有一个增强载荷且在脉冲信号间隔时间也在进行相关积分，则被区域增强信号影响的实际的北斗卫星信号平均信干比为：

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{avg}1} = 10 \times \lg \left[\frac{S_{\text{typ}}(1-d)}{p \cdot d + (1-d)} \right] \tag{10}$$

式中， $S_{\text{typ}} = 10^{(S/D_{\text{typ}} \times 10^{-1})}$ ， $(S/I)_{\text{typ}}$ 表示接收卫星信号的信干比 (SIR，signal interference ratio) 的典型值； $p = P = 10^{(P/D \times 10^{-1})}$ ， P/I 表示区域增强信号与其他卫星信号和热噪声功率之比； d 为脉冲占空比 (PDC，pulse duty cycle)， $0 \leq d \leq 1$ 。

在区域增强系统中存在多个增强载荷，区域增强信号不仅会影响北斗卫星信号的捕获，其相互之间也会产生影响，此时计算增强载荷 SIR 的公式为^[18]：

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\text{avg}N} = 10 \times \lg \left[\frac{S_{\text{max}}d}{p \cdot (N-1)d + 1 - (N-1)d} \right] \tag{11}$$

式中， $S_{\text{max}} = 10^{(S/D_{\text{max}} \times 10^{-1})}$ ， $(S/I)_{\text{max}}$ 表示最大 SIR (饱和值)； N 为增强载荷的数量。由此可知，当存在多个增强载荷时，接收机接收区域增强信号的 SIR 由 PDC 和增强载荷数量 N 两个参数来决定。

根据北斗卫星 B1I 频点信号参数和区域增强信号参数，可以得到在不同 PDC 情况下北斗卫星信号 SIR 和增强载荷的 SIR，如图 8 所示。

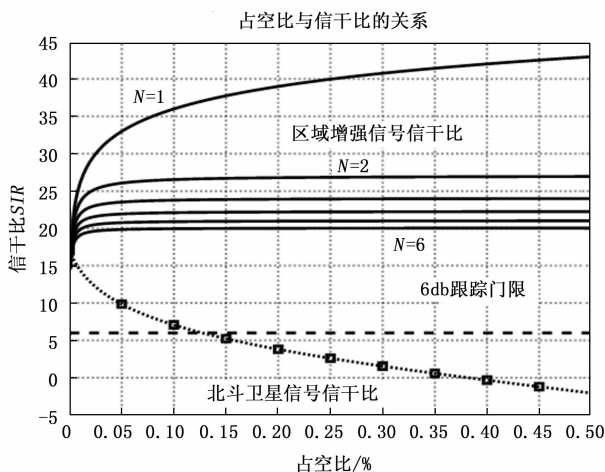


图 8 北斗卫星、增强载荷 SIR 随 PDC 的变化

图中虚线表示接收机跟踪门限为 6 dB (通常为 3 dB，

加上 3 dB 的预留量^[18])，其与点线表示的北斗卫星信号的交点为可接收到北斗卫星信号情况下所允许的占空比最大值，即 $d_{\text{max}} = 13\%$ 。

在捕获脉冲信号时，每个捕获周期的样本数小于一个周期的码片数，此时信号的捕获概率由脉冲信号的偏相关特性决定，即扩频码的一部分与接收机本地扩频码进行相关操作。为满足 99.9% 的捕获概率，偏相关峰值大于设置的捕获门限，此时脉冲信号的最小占空比应大于 6%^[19]。

脉冲占空比决定了脉冲周期中，发射脉冲信号所占整个脉冲周期的时间比例，可以表示为：

$$d = \frac{1}{N_e} \sum_{k=0}^{N_e-1} d_k \tag{12}$$

其中： N_e 表示一个脉冲周期中包含的码周期数量， $d = \frac{1}{N_e}$ ； d_k 表示单个码周期中脉冲信号所占的时间比例。统一占空比方案即 $d_k = d$ ，以保证扩频码的自相关特性。因此需要在 $6\% \leq d \leq 13\%$ 的范围内且满足码周期为脉冲占空比整数倍的范围内选择脉冲占空比。

脉冲调制的占空比 d 对信号功率具有衰减作用，其对区域增强信号的信噪比 (SNR，signal noise ratio) 衰减公式^[21]为：

$$P_{\text{pseudolite, loss}} = 10 \lg(d) \tag{13}$$

对卫星信号 SNR 衰减的公式为：

$$P_{\text{satellite, loss}} = 10 \lg(1-d) \tag{14}$$

根据上述分析，在可用占空比的范围内计算不同占空比对区域增强信号和北斗卫星信号 SNR 衰减，并记录在表 1 中。以占空比尽量小的原则，选取 6.25% 的占空比时对区域增强信号的功率衰减为 12.04 dB，可获得 11.74 dB 的功率冗余量。

表 1 不同占空比对信号的衰减 dB

占空比	6.25%	10%	12.5%
区域增强信号衰减	12.04	10	9.04
卫星信号衰减	0.28	0.46	0.58

3.2 脉冲宽度设计

在码长 $N_c = 2046$ 的情况下，简单根据占空比均分每个时隙的脉冲宽度会导致每个时隙传递的码片数不是整数，造成信号的功率谱混叠。因此可以将每个脉冲信号周期中的 N_e 个脉冲分为 N_n 个普通脉冲和 N_s 个特殊脉冲，即 $d = \frac{1}{(N_n + N_s)}$ 。可以选择 $N_n = 15$ 个普通脉冲和 $N_s = 1$ 个特殊脉冲，脉冲 1 至 15 每个脉冲包含 128 个码片，脉冲 16 包含 126 个码片。每个脉冲信号周期为 16 ms，小于 20 ms 的相干积分时间，如图 9 所示。

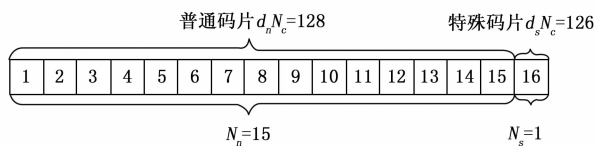


图 9 占空比 6.25% 时脉冲宽度设置

3.3 脉冲图案设计与分析

在系统中存在多个增强载荷时,应采用随机或伪随机的脉冲图案生成方式,并保证每个脉冲信号周期所发射的脉冲信号能够遍历所有脉冲时隙;在发送端减少信号时隙重叠,也能够保证脉冲信号具有良好的相关性,满足用户接收机对脉冲信号捕获的需求。

移位寄存器生成的伪随机序列具有良好的自相关和互相关特性。采用一个 8 位的移位寄存器生成的伪随机序列, 其生成多项式为:

$$G = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8 \quad (15)$$

取其中部分序列转换成十进制, 为防止出现 0 将其加 1, 计算得到在每个码周期中发射脉冲信号的时隙位置, 如图 10 所示。

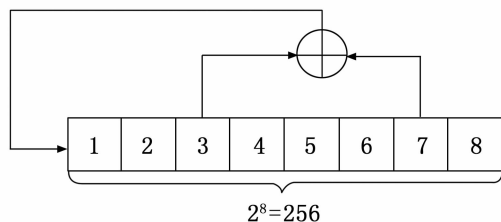


图 10 8 阶移位寄存器产生脉冲时隙位置

可用于 8 阶移位寄存器的本原多项式共 16 个, 能够满足本系统 4 个区域增强信号的使用, 使不同增强载荷播发的信号脉冲时隙得以区分。将产生的脉冲图案序列进行自相关与互相关运算, 其结果如图 11 所示。

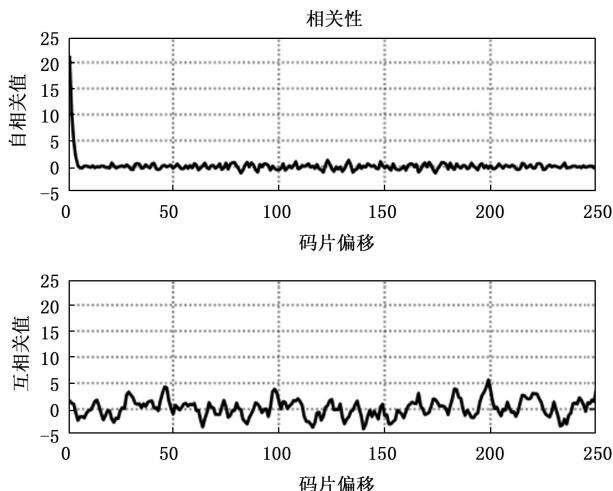


图 11 脉冲图案的自相关和互相关性

由图 11 可知,所设计的脉冲图案具有良好的自相关和互相关性能,而良好的相关性能可以保证经脉冲调制的信号与连续信号的扩频码具有相近的扩频性能。

4 仿真实验与结果分析

4.1 区域增强信号扩频码相关性分析

在信号捕获的过程中, 经过载波剥离的卫星信号扩频码序列会与接收机本地生成的扩频码序列进行相关运算。为了评估脉冲调制对远近效应的改善作用, 可以对区域增强信号和北斗卫星信号扩频码分别与本地扩频码的相关性进行仿真。

当区域增强信号采用与北斗卫星信号相同的连续发射方式,且区域增强信号比北斗卫星信号功率大 40 dB 时,与接收机本地产生的扩频码相关结果如图 12 所示。

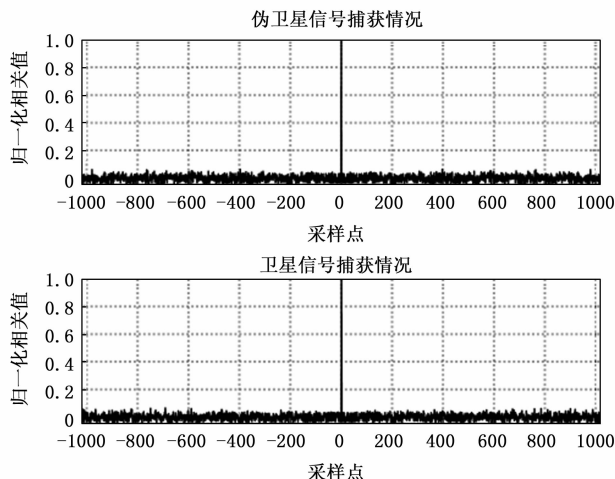


图 12 区域增强连续信号比北斗卫星信号强 40 dB

可以看出在远近效应的影响下,北斗卫星信号受到区域增强信号的干扰,其自相关峰被与区域增强信号的互相关旁瓣淹没,导致无法正常捕获北斗卫星信号。

图 13 表示区域增强信号采用脉冲调制方式, 且其功率比北斗卫星信号大 30 dB 时, 接收机本地产生扩频码的相关值计算。此时区域增强信号与卫星信号的自相关峰值都十分明显, 且旁瓣值较小。尽管区域增强信号功率比卫星信号超出互相干扰的最大隔离度, 理论上接收机能够成功捕获卫星信号。

经过脉冲调制后,区域增强信号总功率被削减,获得一定功率冗余量,对北斗卫星信号的干扰显著相抵,也印证了脉冲调制信号在抗远近效应方面效果明显。

4.2 区域增强信号捕获概率分析

对卫星信号非相干积分输出后的检测结果进行假设检验, 可得到两种情况: H_0 表示只有噪声; H_1 表示既有卫星信号又有噪声。中频信号包含有用信号和附加高斯白噪声, 可认为是高斯随机变量 $n(t)$, 由式可得^[23]:

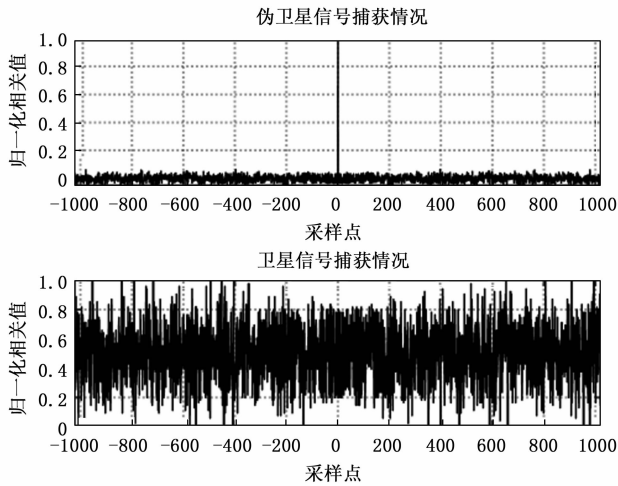


图 13 区域增强脉冲信号比北斗卫星信号强 40 dB

$$\begin{aligned} H_0: y(t) &= n(t) \\ H_1: y(t) &= A \cos(2\pi f_d t + \varphi_i) + n(t) \end{aligned} \quad (16)$$

则在 H_1 情况下判决函数 S_n 服从自由度为 2 的非中心 χ^2 分布, 在 H_0 情况下服从中心化 χ^2 分布。在 H_1 情况下概率密度函数 (PDF, probability density function) 可表示为:

$$p(y) = \frac{y}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{y^2 + A^2}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{yA}{\sigma_n^2}\right) \quad (17)$$

其中: σ_n^2 为噪声功率, $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数。对其求积分可得到检测概率:

$$P_D = \int_{\gamma}^{\infty} p(y) dy = Q_M\left(\sqrt{\frac{A^2}{2\sigma_n^2}}, \sqrt{\frac{\gamma}{\sigma_n^2}}\right) \quad (18)$$

式中, $Q_M(a, b)$ 表示 Marcum Q 函数, γ 表示选取的捕获门限, 一般根据虚警率确定:

$$P_{FA} = \int_{\gamma}^{\infty} \frac{y}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_n^2}\right) dy = \exp\left(-\frac{\gamma}{2\sigma_n^2}\right) \quad (19)$$

从而得到捕获门限:

$$\gamma = \sigma_n^2 \sqrt{-2 \ln P_{FA}} \quad (20)$$

由式 (17) 可知, 求取信号捕获概率需获知信号功率 A^2 和接收机捕获门限值 γ , 将其通过信号的载噪比表示为:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{a^2}{2\sigma_n^2 \cdot T_{\text{coh}}} \quad (21)$$

根据上述描述可知, 捕获概率 P_D 可以由信号载噪比 $\frac{C}{N_0}$ 表示, 可以计算得到在虚警概率 P_{fa} 相同时, 载噪比越高, 捕获概率越高。有无远近效应的影响下, 北斗卫星信号捕获概率的仿真分析如图 14 所示。

图中 L_1 表示存在远近效应干扰, 即增强信号为连续形式时, 北斗卫星信号的捕获概率; L_3 表示不存在增强信号时北斗卫星信号的捕获概率, 可以看出由于远近效应的影响, 当捕获概率达到 99% 时, 所需要的北斗

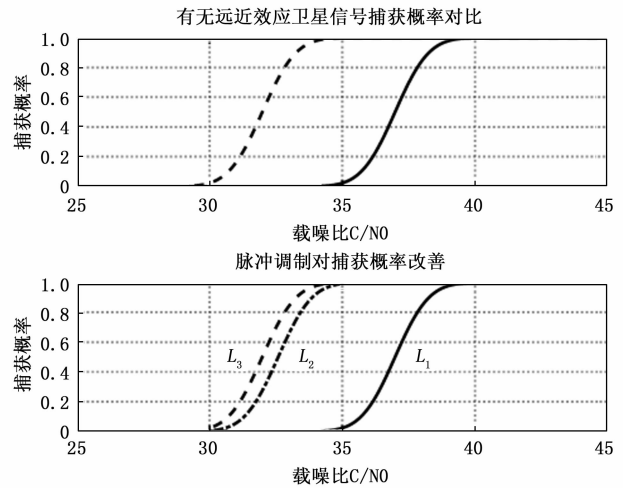


图 14 脉冲调制对卫星信号捕获概率的改善

卫星信号载噪比明显提高。曲线 L_2 表示增强信号采用脉冲调制的方式时, 北斗卫星信号的捕获概率, 可以看出相同载噪比下卫星信号的捕获概率显著提高, 表明增强信号采用脉冲调制, 对北斗卫星信号的干扰显著降低, 从而达到抑制远近效应的作用。

5 结束语

针对空基区域导航增强系统, 设计一套能够与北斗卫星信号兼容的导航增强信号, 该信号采用与北斗信号相同频点与相似的格信号格式, 同时采用 TDMA 时分脉冲调制的方法以削弱远近效应, 最终能够实现同时接收北斗卫星信号与导航增强信号。通过对区域导航增强信号的连续信号和脉冲信号分别进行仿真, 在增强信号比北斗卫星信号强 30 dB 条件下, 连续的增强信号会压制北斗卫星信号, 区域增强信号采用脉冲调制形式时能同时接收到北斗卫星信号和区域增强信号, 实现信号的兼容性。经过对捕获概率的仿真, 在相同载噪比和虚警率下, 当区域增强信号采用脉冲调制方式时, 北斗卫星信号的捕获概率显著提高, 实现对信号抗远近效应。

参考文献:

- [1] 段晨浩. 基于空基伪卫星高精度定位技术研究 [D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2021.
- [2] 杨 龙, 周建华, 胡义勇. 近空间区域导航增强系统信号设计与验证 [J]. 遥测遥控, 2009 (4): 32-39.
- [3] 朱国伟. 基于 FPGA 的 Locata 系统定位接收机设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [4] 闫 宁, 何成龙, 叶红军. 跳时信号体制地基伪卫星远近效应分析 [J]. 无线电工程, 2017, 47 (6): 27-31.
- [5] 黄 颂. 伪卫星/卫星导航软件接收机关键技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023.

- [6] 马鹏程. 直接测距伪卫星应用中远近效应及其抑制技术研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016.
- [7] COBB H S. GPS Pseudolites: theory, design and applications [D]. Stanford, 1997.
- [8] PICOIS A V, SAMAMA N. Near-far interference mitigation for pseudolites using double transmission [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50 (4): 2929–2941.
- [9] 张雷, 王建宇, 戴宁. TDMA 在伪卫星远近效应中的分析与研究 [J]. 微计算机信息, 2008 (10): 236–238.
- [10] STANSEL L, THOMAS A. RTCM SC-104 recommended pseudolite signal specification [J]. Navigation, 1986, 33 (1): 42–59.
- [11] VAN DIERENDONCK A J, FENTON P, HEGARTY C. Proposed airport pseudolite signal specification for GPS precision approach local area augmentation systems [C] // Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997), Kansas City, USA, 1997: 1603–1612.
- [12] 叶红军, 蔚保国, 周必磊. 伽利略伪卫星脉冲调制方案最优化研究 [J]. 无线电工程, 2008, 38 (7): 40–42.
- [13] ABT T L, SOUALLE F, MARTIN S. Optimal pulsing schemes for Galileo pseudolite signals [J]. Positioning, 2007, 6 (2): 133–141.
- [14] BORIO D, ODRISCOLL C. Design of a general pseudolite pulsing scheme [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2014, 50 (1): 2–16.
- [15] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 [公开服务信号 B1I (3.0 版)] [EB/OL]. (2019-02-26) [2023-12-11]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf>.
- [16] 梁仪庆. 基于时分脉冲调制的北斗伪卫星系统的设计 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [17] 张昌良, 吴华兵, 武建锋. 基于脉冲调制的共频带定位系统抗远近效应研究 [J]. 宇航计测技术, 2023, 43 (3): 91–96.
- [18] LEMASTER E A, ROCK S M A. Self-calibrating pseudolite arrays: theory and experiment [D]. PALOALTO: Stanford University, 2002.
- [19] 吴迪. 北斗伪卫星信号远近效应干扰消除技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.
- [20] ELROD B, BARLTROP K, VAN DIERENDONCK A J. Testing and evaluation of GPS augmented with pseudolites for precision approach applications [C] // Proceedings of the 7th Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1994), Salt Lake City, Utah, 1994: 1269–1278.
- [21] 叶红军, 蔚保国. 伽利略多模伪卫星及组网方法技术研究 [C] // 第一届中国卫星导航学术年会, 中国电子科技集团第 54 研究所, 2010: 7.
- [22] DI W, HONGYANG L, WEI C, et al. Design of a pulsing scheme for BeiDou pseudolites signals [C] // International Conference on Transportation Information & Safety. IEEE, 2015.
- [23] STEVEN M, KAY. 统计信号处理基础——估计与检测理论 [M]. 罗鹏飞, 译. 北京: 电子工业出版社, 2022.
- [11] WOO S, DEBNATH S, HU R, et al. Convnext v2: Co-designing and scaling convnets with masked autoencoders [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 16133–16142.
- [12] LI Y Y, YUAN G, WEN Y, et al. Efficientformer: Vision transformers at mobilenet speed [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2022, 35: 12934–12949.
- [13] CHEN J, KAO S, HE H, et al. Run, don't walk: chasing higher FLOPS for faster neural networks [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 12021–12031.
- [14] OUYANG D, HE S, ZHANG G, et al. Efficient multi-scale attention module with cross-spatial learning [C] // 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2023: 1–5.
- [15] TAN M, PANG R, LE Q V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 10781–10790.
- [16] WANG J W, XU C, YANG W, et al. A normalized Gaussian Wasserstein distance for tiny object detection [EB/OL]. (2022-06-14) [2024-05-06]. <https://arxiv.longhoer.net/abs/2110.13389>.
- [17] XU C, WANG J W, YANG W, et al. Detecting tiny objects in aerial images: a normalized Wasserstein distance and a new benchmark [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 190: 79–93.
- [18] WANG X F, VLADISLAV Z, VIKTOR O, et al. Online recognition and yield estimation of tomato in plant factory based on YOLOv3 [J]. Scientific Reports, 2022, 12 (1): 86–89.
- [19] ZHANG Y C, ZHANG W B, YU J Y, et al. Complete and accurate holly fruits counting using YOLOX object detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107–122.
- [20] 赵春江, 梁雪文, 于合龙, 等. 基于改进 YOLOv7 的笼养鸡/蛋自动识别与计数方法 [J]. 农业机械学报, 2023, 54 (7): 300–312.