

卫星波束标校信号码型对比分析

刘会红, 陈敬乔

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 针对 GEO 轨道通信卫星同步定点后会出现周期性漂移, 导致波束指向不确定的问题, 本文对波束标校系统中的信号捕获进行了研究。由于标校信号捕获依赖于标校信号之间的正交性及其自相关特性, 因此文中提出了标校系统中信号码型选择需要考虑的关键问题。特别是在天线存在指向误差时, Ka 频段标校站接收信号功率最大差异可达近 30 dB, 这给标校信号码型设计和标校信号的捕获带来了困难, 因此文中从码型的抗干扰性能、实现复杂度、能量估计精度和捕获特性等几个方面, 分析和对比了 m 序列信号、Walsh 信号、单频信号和 Chirp 信号 (扫频信号) 这 4 种码型各自的优点和缺点, 并用 MATLAB 进行了仿真。结果表明: 在抗干扰性能上, 伪随机序列信号和 Walsh 信号最好, Chirp 信号次之, 单频信号最差; 在复杂度方面, Chirp 最复杂, 伪随机序列和 Walsh 序列次之, 单频方式最简单; 在估计精度方面, 三者的估计精度相当; 在捕获性能方面, Walsh 信号的捕获性能明显优于 m 序列, 而且当两个标校站的接收信号功率之间存在较大差异时, Walsh 信号的捕获性能明显优于 m 序列。因此标校系统可优先选择 Walsh 码作为标校信号。

关键词: 波束标校; Wash 码; 捕获; 抗干扰

中图分类号: TN76 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)01-0030-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220331001

引用格式: 刘会红, 陈敬乔. 卫星波束标校信号码型对比分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 30–36.

Comparative analysis of code types in satellite wave-beam calibrating system

LIU Huihong, CHEN Jingqiao

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the problem of beam pointing uncertainty caused by periodic drift after GEO orbital communication satellite synchronization fixed point, the signal acquisition in beam calibration system is studied in this paper. Because the acquisition of calibration signal depends on the orthogonality and autocorrelation between calibration signals, the key problems to be considered in the selection of signal type in calibration system are proposed in this paper. Especially when the antenna has pointing error, the maximum difference of received signal power of Ka band calibration station can reach nearly 30 dB, which brings difficulties to the design of calibration signal pattern and the acquisition of calibration signal. Therefore, this paper analyzes and compares the advantages and disadvantages of m-sequence signal, Walsh signal, single frequency signal and chirp signal (sweep signal), and the simulation is made with MATLAB. The results show that in terms of anti-interference performance, pseudo-random sequence signal and Walsh signal are the best, Chirp signal is the second, and single frequency signal is the worst; in terms of complexity, Chirp is the most complex, followed by pseudo-random sequence and Walsh sequence, and single frequency mode is the simplest; in terms of estimation accuracy, the estimation accuracy of the three is the same; in terms of acquisition performance, the acquisition performance of Walsh signal is significantly better than m-sequence, and when there is a large difference between the received signal power of two calibration stations, the acquisition performance of Walsh signal is significantly better than m-sequence. Therefore, the calibration system can preferentially select Walsh code as the calibration signal.

Keywords: Beam calibration; Wash codes; Capturing; Anti-interference

Citation: LIU Huihong, CHEN Jingqiao. Comparative analysis of code types in satellite wave-beam calibrating system [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 30–36.

引 言

由于卫星上天之后经历的空间环境比较复杂,光照的改变和剧烈的温度变化等都容易引起天线各通道的相位幅度变化,加上天线器件的不一致性以及制造公差和装配误差等因素的影响,导致GEO星载天线系统通道间幅度和相位不一致^[1]。如果不进行有效的检测与校正,直接进行星上射频波束合成会导致波束指向出现偏差,甚至会指向错误^[2-4]。因此,在卫星入轨后,需要对其天线系统进行周期性的标校。

波束标校是指采用能量测向体制来进行波束指向测量,根据测量结果调整波束指向中心,从而保证天线波束覆盖满足系统要求。移动通信卫星在寿命期内难以保持位置固定,卫星星下点位置会以天为单位,周期性进行漂移,这会导致波束指向的不确定,不能满足应用系统对波束指向精度的要求,影响了系统的正常使用。

波束指向的不确定性主要会对应用系统产生两方面影响^[5-7]:首先,会引起用户收发电平的波动,会对系统工作带来不良影响;其次,指向中心的漂移会造成用户终端所处地理位置与真实波束中心之间距离的偏差,使用户初始接入时隙不确定范围加大,影响随机接入信道的使用效能。

星载天线的在轨标校大致可分为阵内标校和阵外标校^[8-10]。阵内标校即在卫星上安装校正设备,星上自主完成标校;阵外标校是指通过地面终端站、标校站辅助完成相控阵天线的标校。国外很早就开始了对星载阵天线波束标校的研究。国内中电十所、三十八所等多家科研机构对相控阵天线及波束标校方面也有较深入的研究^[11-17]。

由于阵内标校算法会增加星上设备重量及复杂性,对卫星可靠性提出了更高要求。部分通信卫星由于体积重量的限制,无法采用阵内标校,因此天线标校主要采用适应性更强的阵外标校法进行。

为了保证应用系统的使用性能,降低地面应用系统设计复杂度,提高资源利用率,需要在采用三轴姿态动态偏置的基础上,再采用波束标校方式,进一步提高波束的指向精度,以满足应用系统使用要求。波束标校示意图如图1所示。

在波束标校系统中,标校信号码型的选择十分关键,常用的标校信号有m序列信号、Walsh信号、单频信号和Chirp信号(扫频信号)等。其中

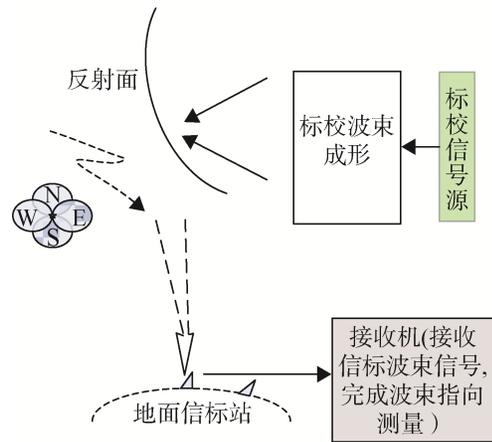


图1 波束标校示意图

Fig. 1 Wave-beam calibration sketch map

m序列信号、Walsh信号均属于PN(Pseudo-Noise)序列,有较好的相关性;Chirp信号为扫频信号。这几种信号各有特点,在实际中可以从实现复杂度、抗干扰性能、估计能量精度,捕获特性等四方面综合考虑加以选择。

1 波束标校原理

在下行标校方式中,GEO卫星波束标校系统接收天线位于如图2所示点 O 。当S、N、W、E四个标校波束的等功率点 O' 与点 O 重合,在点 O 处接收到四个波束的功率电平相等;当四个波束的等功率点 O' 与点 O 不重合,则在点 O 处接收到四个波束的功率电平有差异,根据4个功率电平的差值大小,可计算出标校波束等功率点 O' 与点 O 的位置差。

为了充分利用接收数据,可以采用相关的方法测时差。为了降低卫星功率波动造成的测量误

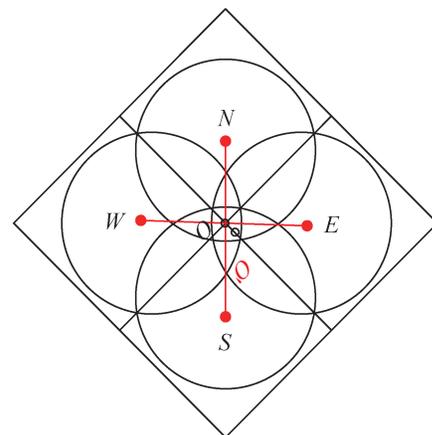


图2 标校原理

Fig. 2 Calibration principle

差, 本系统采用归一化差分指向误差测量方法, 设东向波束测量功率值为 E^2 , 西向波束测量功率值为 W^2 , 南向波束测量功率值为 S^2 , 北向波束功率测量值为 N^2 , 则俯仰指向误差为:

$$\Delta P_{az} = k_{p,az} \times \frac{E^2 - W^2}{E^2 + W^2} \quad (1)$$

滚动误差为:

$$\Delta P_{el} = k_{p,el} \times \frac{N^2 - S^2}{N^2 + S^2} \quad (2)$$

其中, $k_{p,az}$ 和 $k_{p,el}$ 分别为俯仰和滚动测量校正因子。

2 不同类型标校信号性能对比

2.1 抗干扰性能对比

m 序列信号、Walsh 信号和 Chirp 信号均具有一定的抗干扰能力, m 序列信号抗干扰能力与扩频比相关, Walsh 信号抗干扰能力与 Walsh 码长度相关, Chirp 信号抗干扰能力与扫描带宽相关。由于波束标校信号中不调制信息, 因此可以通过对伪随机序列或 Walsh 序列的积累来进一步提高抗干扰能力。以伪随机信号积分长度为 2 047 个码片为例, 伪随机序列可获得最大 33 dB 的抗干扰能力; 而长度为 2 048 的 Walsh 码序列也可获得最大 33 dB 的抗干扰能力, Chirp 信号抗干扰能力与压缩比相关, 如果 Chirp 信号选择 Thuraya 系统中 FCCH 信道采用的信号, 处理增益为 18.74 dB, 抗干扰能力不如 m 序列信号和 Walsh 信号。因此从抗干扰角度看, 伪随机序列信号和 Walsh 信号最好, Chirp 信号次之, 单频信号最差。各码型抗干扰能力对比见表 1。

表 1 各码型抗干扰能力对比

Table 1 Comparison of anti-interference ability of each code type

码型	抗干扰能力
m 序列	优
Walsh 码	优
Chirp 码	次优
单频信号	差

2.2 实现复杂度对比

Chirp 信号不易采用模拟方式实现, 而数字实现需采用向量方式, 特别是四个信号同时产生时, 信号质量与占用带宽、数模转换 (Digital to Analog, DA) 精度等参数有关, 另外对 Chirp 信号的接收处理也有较大难度。

m 序列方式和 Walsh 信号可以采用模拟也可以采用数字方式实现, 由于伪随机序列和 Walsh 信号本质都是 0、1 码, 因此可以通过波形存储或其他方式, 降低 m 序列信号形成难度。另外, 伪随机序列或 Walsh 序列的接收, 由于没有调制信息, 因此较一般扩频信号接收简单。单载波信号可以采用模拟方式生成, 实现最简单。因此在实现复杂度方面, Chirp 最难, 伪随机序列和 Walsh 序列次之, 单频方式最简单。各码型实现复杂度对比见表 2。

表 2 各码型实现复杂度对比

Table 2 Comparison of implementation complexity of each code type

码型	复杂度
m 序列	居中
Walsh 码	居中
Chirp 码	最高
单频信号	最低

2.3 接收能量估计精度对比

由于 Chirp 信号抗干扰能力弱于伪随机序列信号和 Walsh 信号, 实现又比伪随机序列信号和 Walsh 信号复杂, 因此在性能方面只进行伪随机序列、Walsh 信号和单频信号高斯白噪声条件下的能量估计精度对比。

高斯信道下, 接收机接收到的中频信号可表示为:

$$r_1(t) = \text{Re}[As(t-\tau)e^{j(\omega_0 t + \theta)}] + n_1(t) \quad (3)$$

式中, $n_1(t)$ 为高斯白噪声, 单边功率谱密度为 N_0 ; $s(t-\tau)$ 为基带信号波形, A 为信号幅度; ω_0 、 θ 分别为载波角频率和载波相位; τ 为信号传输时延。等效复基带信号表示为:

$$r(t) = As(t-\tau)e^{j(\omega_0 t + \theta)} + n(t) \quad (4)$$

其中, $n(t)$ 为复高斯噪声, 单边功率谱密度为 $4N_0$, 且有:

$$E[n(t)n^*(u)] = 2N_0\delta(t-u) \quad (5)$$

ω 、 θ 分别为载波剩余频差和相差; $s(t-\tau)$ 为接收到的基带信号波形, 对于 PSK 调制信号, 有:

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a(n)h(t-nT) \\ &= h(t) \otimes \sum_{n=-\infty}^{\infty} a(n)\delta(t-nT) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: \otimes 表示卷积; T 为符号周期; $a(n)$ 为发送的符号序列。本文假定为 i.i.d 序列 (独立同分布), 且有:

$$E[a(m)a^*(k)] = \delta(m-k) = \begin{cases} 1 & m=k \\ 0 & m \neq k \end{cases} \quad (7)$$

$h(t)$ 为信道脉冲响应。本文假定 $h(t)$ 具有归一化能量, 即:

$$\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} h(t)h^*(t)dt = 1 \quad (8)$$

根据式(6)~式(8), 可得:

$$E[s(t)s^*(t)] = 1 \quad (9)$$

在观测时间间隔 $T' = LT$ 内接收到的信号能量为:

$$E = E_s L = \frac{1}{2} \int_0^{T'} A^2 s(t)s^*(t)dt = \frac{T' A^2}{2} = \frac{L T A^2}{2} \quad (10)$$

式中, L 为观测符号数, E_s 为接收信号的每符号能量, T 为符号周期。

估计信号幅度时, 考虑式(4)的基带模型, 并假定信号传输时延为0。在观测时间间隔 T' 内, 接收信号 $r(t)$ 的对数似然函数可表示为:

$$\ln p(r|A) = \ln F - \frac{1}{2N_0} \int_0^{T'} |r(t) - As(t)e^{j(\omega t + \theta)}|^2 dt \quad (11)$$

其中, F 为常数, 将上式对参量 A 求导, 得到:

$$\frac{\partial \ln p(r|A)}{\partial A} = \frac{1}{2N_0} \int_0^{T'} \{ [r(t) - As(t)e^{j(\omega t + \theta)}] s^*(t) e^{-j(\omega t + \theta)} + \int_0^{T'} \{ [r^*(t) - As^*(t)e^{-j(\omega t + \theta)}] s(t) e^{j(\omega t + \theta)} \} dt \quad (12)$$

考虑到幅度 A 为实数, 因此最大似然估计 \hat{A} 是下述方程的解:

$$\operatorname{Re} \left[\frac{\partial \ln p(r|A)}{\partial A} \Big|_{A=\hat{A}} \right] = 0 \quad (13)$$

对上式求解, 并考虑式(7)的条件, 得最佳估计值:

$$\hat{A} = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{T'} \int_0^{T'} r(t) s^*(t) e^{-j(\omega t + \theta)} dt \right] \quad (14)$$

将式(4)代入式(12), 可得单参量估计时的费什尔信息矩阵 F 的元素:

$$F_{11} = E \left[\left| \frac{\partial \ln(p(r|A))}{\partial A} \right|^2 \right] = \frac{2}{4N_0^2} \quad (15)$$

$$\int_0^{T'} \int_0^{T'} E[n^*(t)n(u)] s(t)s^*(u) dt du$$

将式(5)代入上式, 得到:

$$F_{11} = \frac{1}{N_0} \int_0^{T'} s(t)s^*(t)dt = \frac{T'}{N_0} \quad (16)$$

上式的推导利用了式(7)的条件。因此幅度估计的克拉美-罗界(Cramer-Rao Bound, CRB)为:

$$\operatorname{CRB}(\hat{A}) = F_{11}^{-1} = \frac{N_0}{T'} = \frac{N_0}{LT} \quad (17)$$

其中, T' 为观测时间, L 为观测的符号数, T 为符号周期, N_0 为噪声单边功率谱密度。可见, 估计方差随观测时间的增加而线性减小。根据式(17), 得到归一化幅度估计的CRB:

$$\operatorname{CRB} \left(\frac{\hat{A}}{A} \right) = \frac{N_0}{A^2 LT} = \left(2L \frac{E_s}{N_0} \right)^{-1} \quad (18)$$

根据(14)式得出估计均值为:

$$E(\hat{A}) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{T'} \int_0^{T'} E[As(t)s^*(t) + n(t)s^*(t)e^{-j(\omega t + \theta)}] dt \right\} = A \quad (19)$$

可见基于(14)式的最佳估计为无偏估计。幅度估计方差为:

$$\sigma_A^2 = E(\hat{A}^2) - A^2 = \frac{1}{4} E \left\{ \left[\int_0^{T'} r(t) s^*(t) e^{-j(\omega t + \theta)} dt + \int_0^{T'} r^*(t) s(t) e^{j(\omega t + \theta)} dt \right]^2 \right\} - A^2 = \frac{N_0}{T'} = \operatorname{CRB}(\hat{A}) \quad (20)$$

可见式(14)的最佳估计值的估计方差与CRB一致, 即PSK信号的幅度估计方差仅与观测的符号数、符号周期及噪声单边功率谱密度有关, 所以在相同的观测时间内, 伪随机序列、Walsh信号和单频信号在同一高斯白噪声条件下的幅度估计方差是相同的, 即三者的能量估计精度相当。

幅度估计方差与观测的符号数 L 和 E_s/N_0 均成反比, 当 E_s/N_0 分别为 3 dB 时, 归一化幅度估计方差与 L 的关系如图3所示。

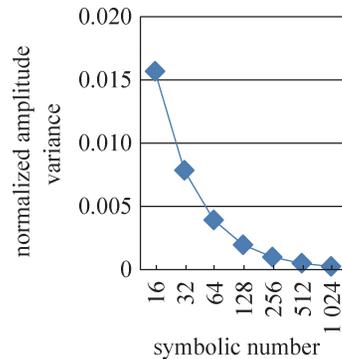


图3 归一化幅度估计方差与 L 的关系
Fig. 3 The relationship between normalized σ_A^2 and L

2.4 捕获性能对比

标校信号捕获依赖于标校信号之间的正交性及其自相关特性。另外, 在天线存在指向误差时, 标校站接收信号功率不同, 且最大的功率差异可达近 30 dB, 这给标校信号码型设计和标校信号的捕获带来了难度。

若采用长 GOLD 码低码率的设计方法, 则为了保持各波束标校信号的正交性, 接收端需进行整个码周期的相关匹配。以码片速率 10 000 chip/s, 积分长度为 8 192 个码片为例, 匹配后的等效符号率

仅为 Hz 数量级, 很难实现信号跟踪和能量测量。若采用部分匹配方式, 码型正交性的破坏将使输出结果呈现出多值现象。图 3 是生成多项式为 $x^{11} + x^2 + 1$ 的 m 序列在各路信号接收功率不同且无噪声叠加情况下的捕获情况。其中 x 轴表示归一化载波频偏 ($\Delta f/R_c$, R_c 为码片速率), y 轴表示归一化捕获峰值 ($S/\max(S)$)。由图 4 可知, 当信号间功率差达到 24 dB 以上时, 归一化峰值呈现出多值现象, 将影响判决结果和测量精度。

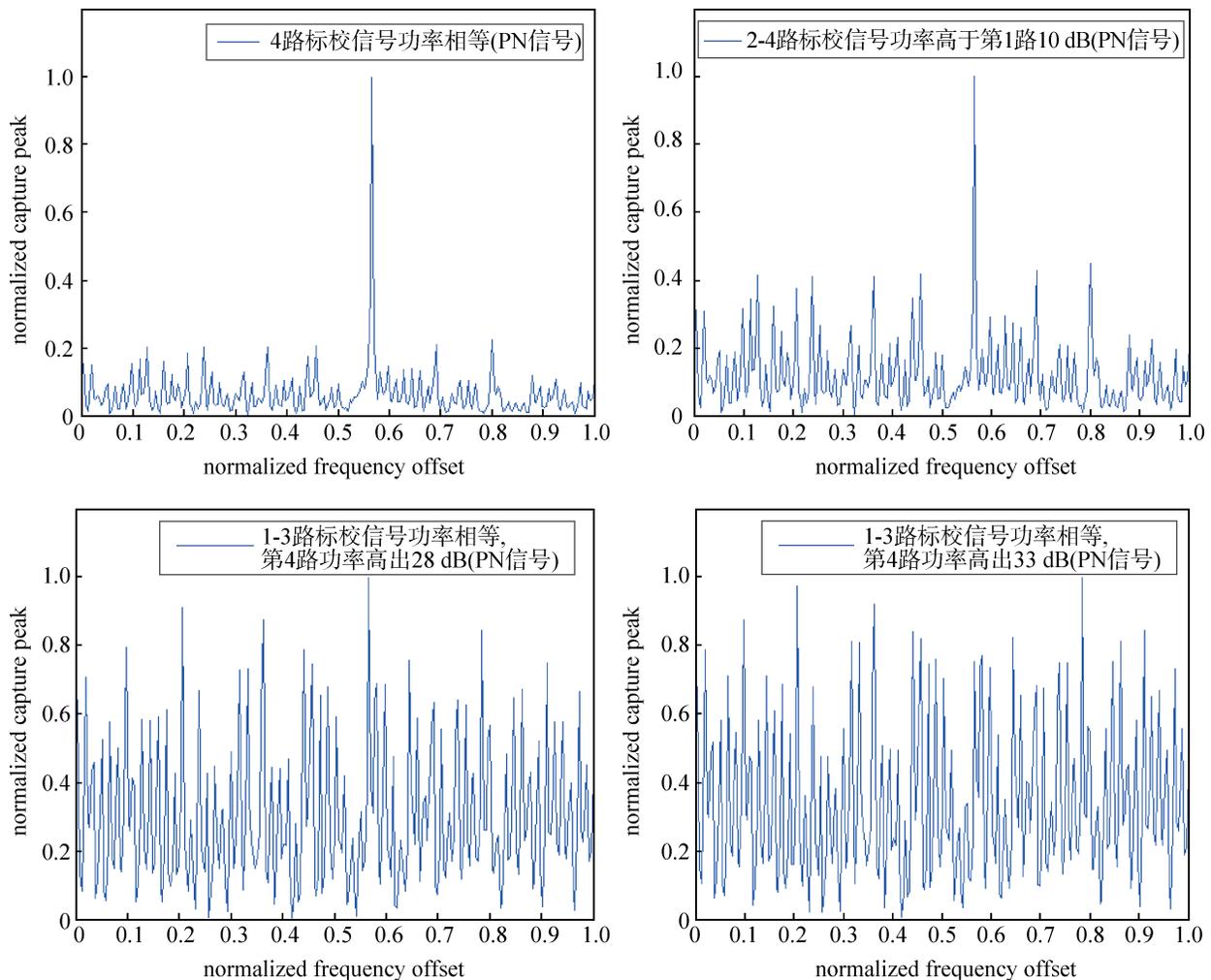


图 4 不同情况下 1 号标校站 m 信号的捕获峰值

Fig. 4 Capture peak on No.1 calibration station under different conditions

由于系统能够保证下行标校信号之间的同步关系, 所以标校信号可选择使用长度为 256 的 Walsh 码作为信息码, 不同波束选择不同 Walsh 码来区分; 根据 Walsh 码间的正交特性, 在 256 个码片的积分周期内, 其他波束信号对本波束信号没

有影响。图 5 是采用 256 位长 Walsh 码, 在各路信号接收功率不同情况下捕获接收时的归一化信号功率, 由图可知, 在各路信号等功率至信号功率最大相差 30 dB 情况下, 各路信号均呈现出较好的捕获特性。

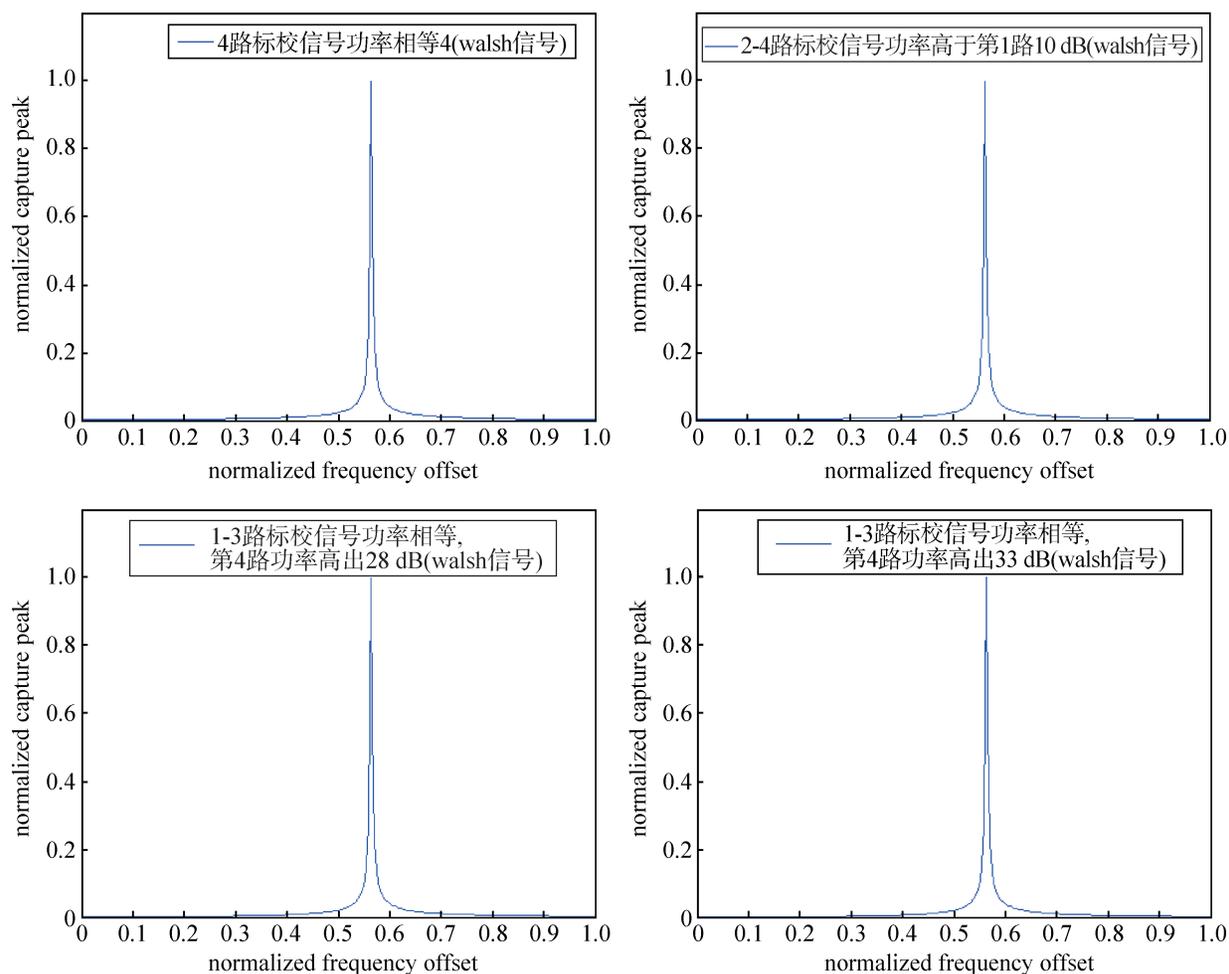


图5 不同情况下1号标校站Walsh信号的捕获峰值

Fig. 5 Capture peak of Walsh on No.1 calibration station under different conditions

就捕获性能来看, 当两个标校站的接收信号功率之间存在很大的差异时, Walsh信号的捕获性能要明显优于m序列。所以, 选择Walsh序列作为标校信号。

3 结束语

通过上文的分析可知: 从抗干扰角度看, Walsh信号和伪随机序列信号最好, Chirp信号次之, 单频信号最差; 在实现复杂度方面, Chirp最难, 伪随机序列和Walsh序列次之, 单频方式最简单; 就捕获性能来看, 在两个标校站的接收信号功率之间存在很大的差异时, Walsh信号的捕获性能明显要优于m序列。

因此, 在系统能够保证下行标校信号之间的同步关系的前提下, 综合考虑, 标校系统选择Walsh序列作为标校信号较为合适。

参考文献

- [1] ZENG X W, ZHANG Z J, DING D T, et al. Calibration method for airborne radar located on ground[J]. Modern Radar, 2005: 68-70.
- [2] ISHII M, SHIMADA Y. Reference calibration methods for small circular loop antenna in low-frequency band[J]. Transactions on Instrumentation and Measurement, IEEE, 2009: 1097-1103.
- [3] 李凤祥. 天线角度的近场标校与距离的无塔校零[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [4] 石岩岭, 姜兴平. 卫星天线方向的调试[J]. 雁北师范学院学报, 2001, 17(5): 104-106.
SHI Yanling, JIANG Xingping. Debugging of satellite antenna[J]. Journal of Yanbei Normal University, 2001, 17(5): 104-106.
- [5] 席文君. 一种便捷的距离零值标校方法[J]. 电讯技术, 2003, 4: 99-101.

- XI Wenjun. A simple and easy range zero value calibration method[J]. Telecommunication Engineering, 2003, 4: 99-101.
- [6] 耿淑敏, 黄蕾, 高坚, 等. S 频段星载相控阵天线在轨标[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(3): 175-180.
GENG Shumin, HUANG Lei, GAO Jian, et al. Calibration technology for in-orbit S-band phased array antennas [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(3): 175-180.
- [7] 阎鲁滨. 星载相控阵天线的技术现状及发展趋势[J]. 航天器工程, 2012, 21(3): 11-13.
YAN Lubin. Technology status and developing trends of satellite phased array[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(3): 11-13.
- [8] 雷振亚, 谢拥军. 微波电子线路[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009: 200-230.
- [9] MAILLOUX, ROBERT J. 相控阵天线手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 250-280.
- [10] 方敏. 星载相控阵天线波束校正[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [11] 黄蕾, 章仁飞, 董航. 相控阵天线正交四相编码校正方法[J]. 电子科学技术, 2015, 2(2): 177-181.
HUANG Lei, ZHANG Renfei, DONG Hang. A orthogonal 4-phase coding calibration method for phase array antenna[J]. Electronic Science & Technology, 2015, 2(2): 177-181.
- [12] 苏立红, 寇艳玲. 卫星移动通信多频段终端天线的发展[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(2): 48-51.
SU Lihong, KOU Yanling. Advancements in multi-band antennas for mobile satellite communication terminals [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(2): 48-51.
- [13] 刘嘉兴. 相控阵测控系统的特点和主要技术问题[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(1): 194-200.
- LIU Jiaying. Features and main technical issues in phased array TT&C system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(1): 194-200.
- [14] 李蝉, 刘敏, 于益农. 口面天线无塔校相方法[J]. 电讯技术, 2009, 49(8): 73-75.
LI Chan, LIU Min, YU Yinong. Towerless phase calibration methods for aperture antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(8): 73-75.
- [15] 刘嘉兴. 利用射电星噪声的无塔校相方法[J]. 电讯技术, 2010, 50(6): 1-4.
LIU Jiaying. Towerless phase calibration using radio star noise[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(6): 1-4.
- [16] 汪远玲, 仇三山, 汪晓燕. 深空系统低信噪比任意信号角跟踪接收机[J]. 电讯技术, 2009, 49(4): 45-48.
WANG Yuanling, QIU Sanshan, WANG Xiaoyan. An arbitrary-waveform-signals angle tracking receiver for deep space system[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(4): 45-48.
- [17] 刘童岭, 邵长宝, 周成刚. 船载雷达无塔动态相位标校方法研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(24): 5989-5993.
LIU Tongling, SHAO Changbao, ZHOU Chenggang. Study on the towerless dynamic phase calibration method for vessel track and control radar[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(24): 5989-5993.

[作者简介]

刘会红 1979年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统。

陈敬乔 1981年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星抗强干扰通信。

(本文编辑: 傅 杰)