

引用格式: 陈校非, 卢晓春, 王雪, 等. 星地链路的 Cn 频段导航信号设计与测距性能分析[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 132-141.

星地链路的 Cn 频段导航信号设计与测距性能分析

陈校非^{1,2,3}, 卢晓春^{1,2,3}, 王雪^{1,2,3}, 克兢^{1,2,3}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600)

摘要: Cn 频段是除 L 频段外唯一受国际电联保护的导航频段, 可以通过在 Cn 频段开展导航业务解决目前 L 频段所面临的频谱拥挤和易受干扰等问题。然而, Cn 频段的应用也面临着带宽受限以及缺少 Cn 频段星地链路测距性能验证等问题。为了解决以上问题, 本文设计了余弦滚降码片成型的导航信号, 以减轻对相邻业务的干扰以及滤波器群时延非理想特性引入的测距偏差。并在此基础上开展了基于星地链路的 Cn 频段导航信号测距性能试验。试验结果表明, Cn 频段导航信号测距性能与仿真结果整体趋势一致, 当载噪比从 49.30 dB-Hz 下降到 35.88 dB-Hz, 其测距性能也从 0.484 2 m 降低到 2.031 0 m。

关键词: Cn 频段; 测距性能; 带宽受限; 星地链路

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-02-132-10

Navigation signal design and ranging performance analysis of Cn band based on satellite-to-ground link

CHEN Xiao-fei^{1,2,3}, LU Xiao-chun^{1,2,3}, WANG Xue^{1,2,3}, KE Jing^{1,2,3}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: For the navigation services, the Cn band is the only priority frequency band and also protected by the ITU except for L band, thus Cn band can provide navigation services to solve problems of spectrum congestion and vulnerability to interference faced in L band. However, used Cn band for navigation still faces some problems such as limited-bandwidth and lack of satellite-to-ground link ranging performance test. To solve these problems, this paper designed the navigation signal with cosine roll-off chip forming, the purpose is to reduce interference to adjacent services and ranging bias introduced by filter with non-ideal characteristic group delay. Based on the designed signal, the Cn band navigation signal test is carried out with the satellite-to-ground link. The results show that the trend of the ranging performance by the Cn band signals is consistent with the simulation results, and while the carrier-to-noise ratio decreases from 49.30 dB-Hz to 35.88 dB-Hz, the ranging performance also dropped from 0.484 2 m to 2.031 0 m.

Key words: Cn band; ranging performance; limited-bandwidth; satellite-to-ground link

0 引言

全球卫星导航系统是现代社会必不可少的基础设施，为人们提供导航、定位与授时服务。目前的全球卫星导航系统主要在 L 频段播发导航信号，但是由于 L 频段频谱拥挤，很难再提供多样化的导航服务。另一方面，由于卫星导航信号落地功率较低，易于受到干扰。而 Cn 频段（5 010 ~ 5 030 MHz）作为除 L 频段外，唯一受国际电联（ITU）保护的导航频段，其在新型导航服务、载波测距精度、电离层延迟以及易于阵列天线接收^[1]等方面的优势，能够很好地解决目前 L 频段导航所面临的问题，并与 L 频段导航形成优势互补的导航业务。

在 2000 年，伽利略卫星导航系统为了解决授权信号的兼容性问题，首先提出了将 Cn 频段作为导航频段并打算在该频段上发射授权信号^[2-3]。同时，M. Irsigler 等^[4-5]对于在 Cn 频段开展导航服务的优缺点和基本性能进行了比较深入的研究。由于 Cn 频段在空间链路传输的衰减更大，因此与 L 频段相比，在取得相同落地功率的条件下，Cn 频段需要更大的卫星发射功率。而由于星上功率受限，并且设备的复杂度和造价较高，因此伽利略一代系统放弃了将 Cn 频段作为导航服务频段的计划，但是明确说明将考虑在伽利略二代系统上搭载 Cn 载荷^[6-7]。随着技术的发展，以上问题将不再是严格的限制条件，作为重要的导航频率资源，Cn 频段又被重视起来。G. W. Hein 等^[8]分析了在 Cn 频段开展导航服务的可行性。艾国祥等^[9]研究了利用 Cn 频段提供高精度服务的可行性。J. Thomas 等^[10]通过地面测试对比分析了 L 频段和 Cn 频段的导航性能。严银江等^[11]给出了 Cn 频段导航信号的雨衰特性分析。王瑛等^[12]研究了 Cn 频段导航技术特点与应用前景。孙岩博等^[13]研究了 L/C 双频应用的一种调制方式，李志芸等^[14]则对 Cn 频段与其相邻业务的兼容性进行了研究和分析。但是，在这些研究中，缺少对 Cn 频段星地链路测距性能的测试与分析。

本文针对 Cn 频段导航带宽受限的特性，设计了基于余弦滚降的码片成型信号，以减小测距偏差和对相邻业务的干扰，并以此为基础针对 Cn 频段导航链路的测距性能开展试验和测试。基于设计的 Cn 频段导航信号，利用转发卫星平台开展了 Cn 频段导航信号星地链路的测距性能测试，并提供了 Cn 频段开展导航业务的测距性能分析结果，为将来在 Cn 频段开展导航服务提供参考和支撑。

1 Cn 频段导航信号设计

1.1 频点选择

Cn 频段及其相邻电信业务如图 1 所示。从图 1 可以看出，Cn 频段带宽只有 20 MHz，其上边带是微波着陆业务（MLS），下边带是射电天文业务（RAS）和伽利略系统上行链路。通常情况下，由于射电天文业务对带外干扰有严格的要求，因此为了最大化 Cn 频段的频带利用率以及减轻对射电天文业务的干扰，信号频点应该选择 Cn 频段中心处或者靠近中心点处向上边带偏移一些。

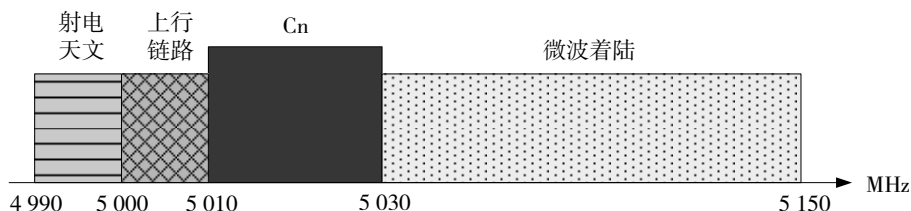


图 1 Cn 频段及其相邻电信业务示意图

另一方面,考虑到测距码与载波频率应该同源,从而可以用载波辅助码伪距测量提高测距精度,因此,载波频率应为测距码频率的整数倍。表 1 中列出了几种备选的载波频率。

表 1 几种备选的载波频率

码频率/MHz	载波频率与码频率的倍数	载波频率/MHz
10.23	490	5 012.700
10.23	491	5 022.930
10.23	492	5 033.160
5.115	980	5 012.700
5.115	981	5 017.815
5.115	982	5 022.930
2.046	2453	5 018.838
2.046	2454	5 020.884
2.046	2455	5 022.930

从表 1 中可以看到,最接近中心频率点的频率为 5 020.884 MHz,但是表 1 中只有 2.046 MHz 的码频率设计能够满足该条件,这为信号设计带来了限制。而 5 022.930 MHz 不仅能够满足不同的测距码速率条件下的整数倍关系,增加设计的灵活性,还相对于中心频点向上边带偏移了 2.930 MHz,能够减小对射电天文业务的干扰,考虑到以上因素,在测试过程中,Cn 频段的中心频点选择了 5 022.930 MHz。

1.2 信号设计

由于 Cn 频段的带宽只有 20 MHz,因此综合考虑频谱利用率以及性价比后,考虑采用 QPSK 调制。QPSK 分别在同相相位和正交相位上调制了不同的伪随机码,可以表示为

$$s_{\text{QPSK}} = c_1 g_1(t) \cos(2\pi f_c t) - c_2 g_2(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式(1)中: c_1 和 c_2 为伪随机码,伪随机码速率为 $n \times 1.023$ MHz,称为 QPSK(n)调制; $g_1(t)$ 和 $g_2(t)$ 为信号码片波形,这里为矩形码片; f_c 为载波频率,这里为 5 022.930 MHz。同时考虑提高频谱利用率以及降低对带外信号的干扰,因此选择采用 QPSK(5)调制。

由于 Cn 频段是一个带宽受限的导航频段,其上边带为微波着陆业务,下边带为射电天文业务,尤其是射电天文业务,对于带外干扰信号的要求很严格,因此 Cn 频段的导航信号需要考虑带宽受限对于 Cn 频段导航信号性能的影响。通常情况下,为了抑制 Cn 频段对带外业务的干扰需要通过滤波器对信号进行滤波,但是一方面 Cn 频段与相邻射电天文频段相隔较近,对于射频滤波器的设计具有一定的难度;另一方面,滤波器非线性的群时延特性会引起导航信号相关峰的畸变,引入测距偏差,如图 2 和图 3 所示。

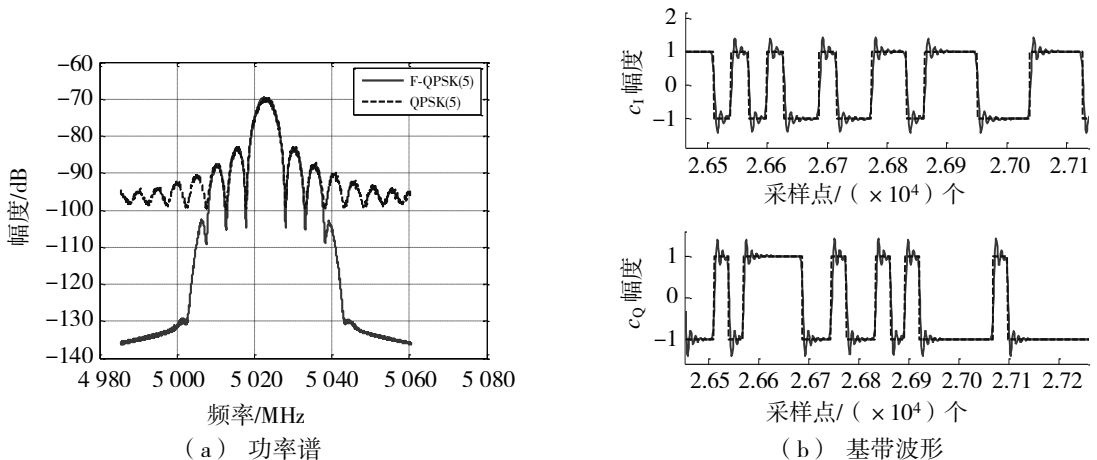


图 2 QPSK(5)信号及其滤波后的功率谱和基带波形

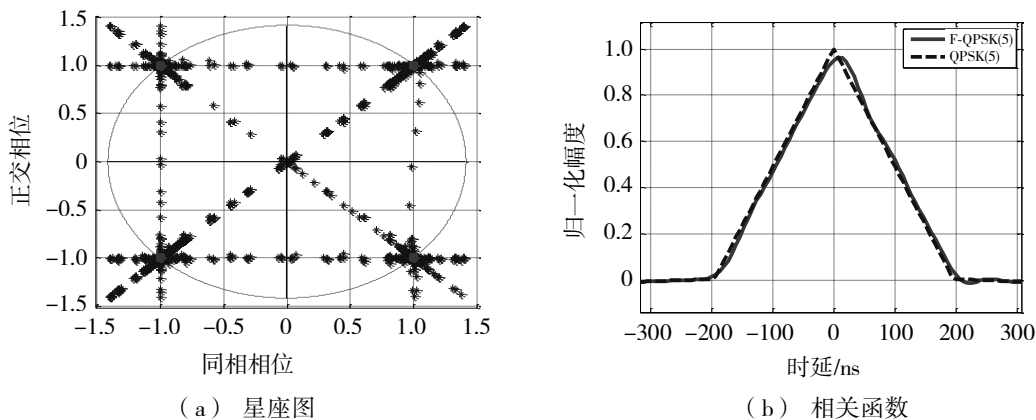


图 3 QPSK(5)信号及其滤波后的星座图和相关函数

图 2 给出了采用 12 阶切比雪夫滤波器滤波前后的功率谱和时域波形，图 3 给出了滤波前后的星座图和相关函数。从图 2 和图 3 可以看出，虽然滤波器滤除了带外信号，但是其会引起时域信号的振铃效应，破坏了时域信号的对称性，从而引起其相关函数的畸变，这种畸变会造成导航信号的测距偏差。

为了减小对带外信号的干扰，同时不因滤波器引入较大的测距偏差，本文采用了基于余弦滚降的码片成形的信号调制方法。对于滚降系数为 α 的成形码片，其可以表示为

$$g_{RC}(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq \frac{1-\alpha}{2} \\ \sin \left[\frac{\pi}{\alpha} \left(t + \frac{1}{2} \right) \right] & -\frac{1}{2} \leq t < -\frac{1-\alpha}{2} \\ \cos \left[\frac{\pi}{\alpha} \left(t - \frac{1-\alpha}{2} \right) \right] & \frac{1-\alpha}{2} < t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

将式 (2) 中的码片波形代入式 (1) 中，可以得到余弦滚降 QPSK(n) 调制 QPSK(n)-RC(α)，表示为

$$s_{QPSK-RC} = c_I g_{RC}(t) \cos(2\pi f_c t) - c_Q g_{RC}(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (3)$$

图 4 给出了不同滚降系数的 QPSK(5)-RC 调制信号功率谱图以及成型前后信号的时域波形图。从图 4 可以看出，经过信号成形，会抑制带外信号的泄露，同时由于成形信号是对称的，不会造成时域波形的畸变。定义 Cn 频段信号对射电天文频段的干扰功率为

$$P_{RAS} = \int_{4990 \text{ MHz}}^{5000 \text{ MHz}} G(f) df \quad (4)$$

式 (4) 中： $G(f)$ 为 Cn 频段信号功率谱。将滚降系数分别为 $\alpha = 0.25, 0.5$ 和 1.0 的功率谱代入式 (4) 中，与未做成型的 QPSK(5) 信号相比，其干扰功率下降百分比如表 2 所示。

表 2 不同滚降系数与未成型 QPSK 信号相比功率下降百分比

成型系数	与未成型 QPSK 相比下降功率百分比/%
0.25	96.49
0.5	99.66
1.0	99.87

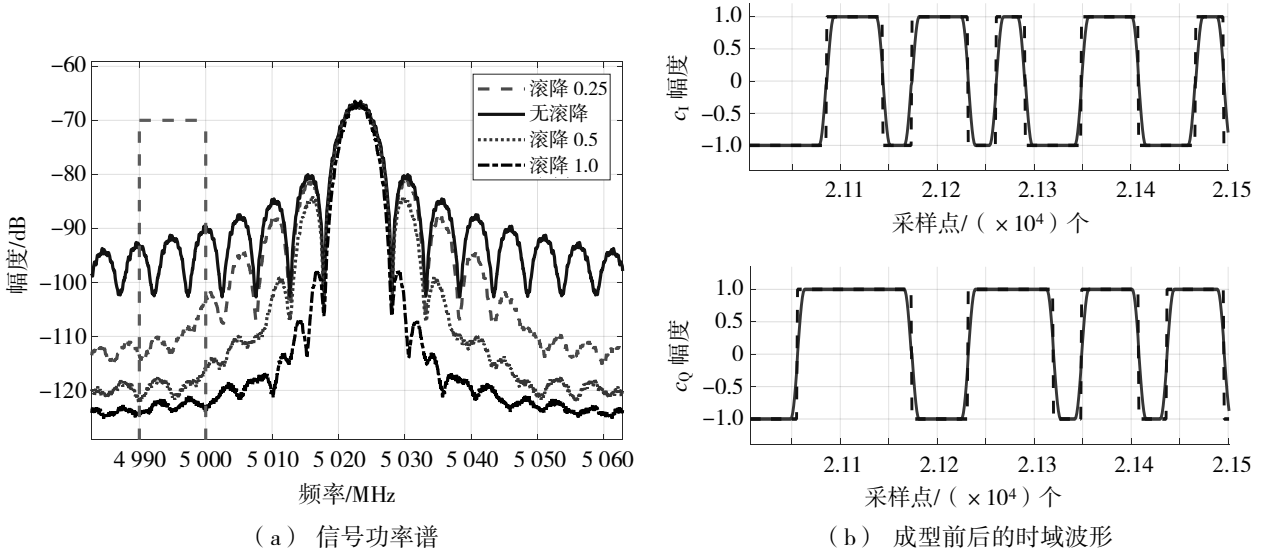


图 4 QPSK(5)-RC(α)信号功率谱和成型前后的时域波形

图 5 给出了不同滚降系数的 QPSK(5)-RC 调制信号成型前后的星座图和相关函数。从图 5 可以看出，经过成型后，信号相位不会发生较大的跳变，会趋于连续变化，因此能够抑制带外高频分量，由于时域波形具有对称性，因此不会引起相关函数的畸变，从而避免引入测距偏差。但是尽管随着滚降系数的增加，能获得更好的带外信号抑制能力，也同时会造成相关函数尖峰变得平滑，从而影响其抗噪声性能。

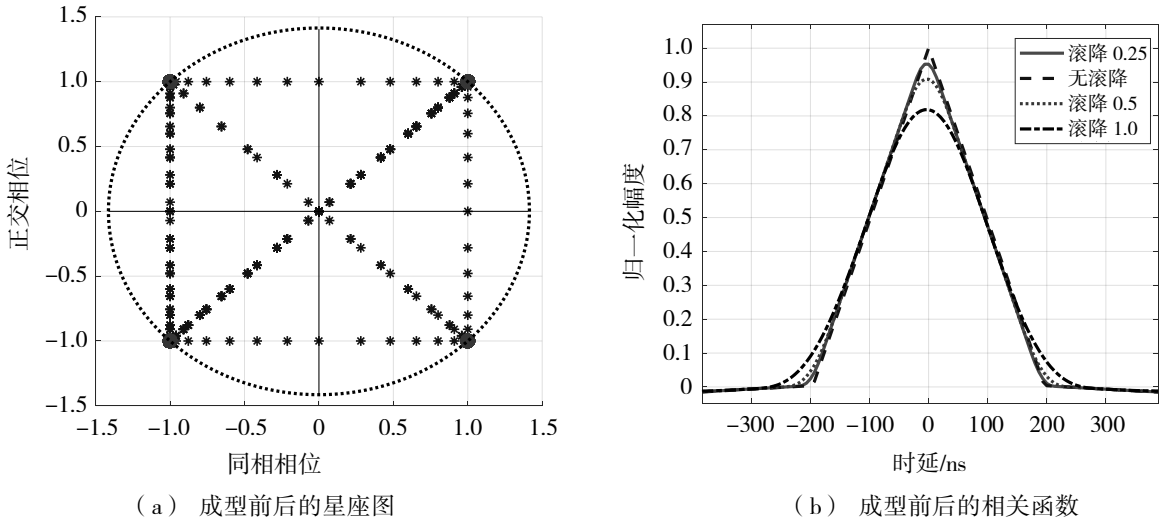


图 5 QPSK(5)-RC(α)信号成型前后的星座图和成型后的相关函数

1.3 测距性能分析

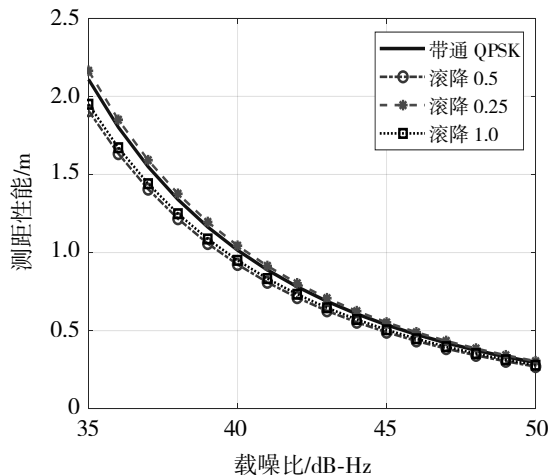
根据测距精度公式，容易得到信号的理论测距性能^[15]：

$$\sigma^2 = \frac{B(1-0.25BT) \int_{-\beta/2}^{\beta/2} G_{s_0}(f) \sin^2(\pi f \Delta) df}{(2\pi)^2 (C/N_0) \left(\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f G_{s_0}(f) \sin(\pi f \Delta) df \right)^2} \times \left(1 + \frac{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} G_{s_0}(f) \cos^2(\pi f \Delta) df}{T(C/N_0) \left(\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f G_{s_0}(f) \cos(\pi f \Delta) df \right)^2} \right) \quad (5)$$

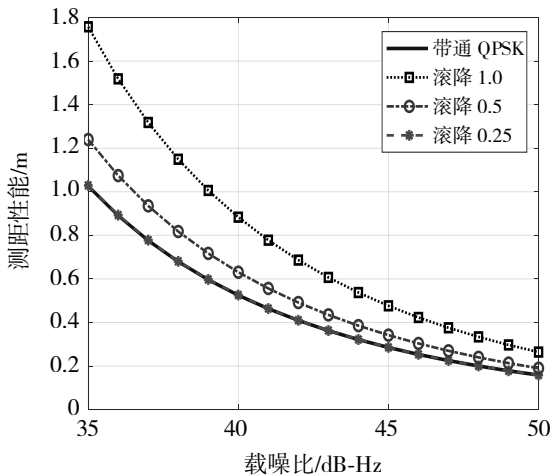
式 (5) 中： β 是射频前端带宽； B 为环路带宽； $G_{s_0}(f)$ 为归一化功率谱； Δ 为接收机早迟码相关间隔； C/N_0 为载噪比； T 是非相干积分时间。

图 6 给出了在环路带宽 $B = 5$ Hz，非相干积分时间 $T = 1$ ms，射频前端带宽 $\beta = 20$ MHz，载噪比 C/N_0 从 35 dB-Hz 到 50 dB-Hz 变化以及早迟码相关间隔分别为 $\Delta = 200$ ns 和 $\Delta = 20$ ns 时，所对应的测距码跟

踪精度。



(a) 相关间隔为 200 ns 条件下的测距精度



(b) 相关间隔为 20 ns 条件下的测距精度

图 6 QPSK(5)-RC(α)信号及带通 QPSK 信号在相关间隔为 200 ns 和 20 ns 条件下的测距精度

从图 6 可以看出，在宽相关（相关间隔为 200 ns）条件下，带通 QPSK 信号与不同滚降系数的 QPSK-RC(α)信号具有相似的测距精度。但是随着相关间隔的减小，在窄相关（相关间隔为 20 ns）条件下，滚降系数为 0.5 和 1.0 的 QPSK-RC(α)信号测距精度明显要比带通 QPSK 信号以及滚降系数为 0.25 的 QPSK-RC(α)信号差。这是因为滚降系数为 0.5 和 1.0 的 QPSK-RC(α)信号相关峰顶端变得更为圆滑，降低了窄相关条件下信号的抗噪声性能，从而引起了信号测距性能的恶化，在低载噪比条件下，这种恶化将达到 0.2~0.7 m。

考虑 Cn 频段的导航应用，应在不对信号测距性能产生严重恶化的条件下，尽量减少对相邻业务的干扰，因此本次试验采用了 QPSK(5)-RC(0.25)信号，使得在带宽受限条件下，不引入额外的测距偏差，同时其窄相关测距性能也不会明显恶化，也能够降低对相邻射电天文业务的干扰。

2 试验设备与试验方法

试验系统的整体设备如图 7 所示，包括：信号生成设备、发射天线、在轨卫星、接收天线、接收设备以及数据分析设备。

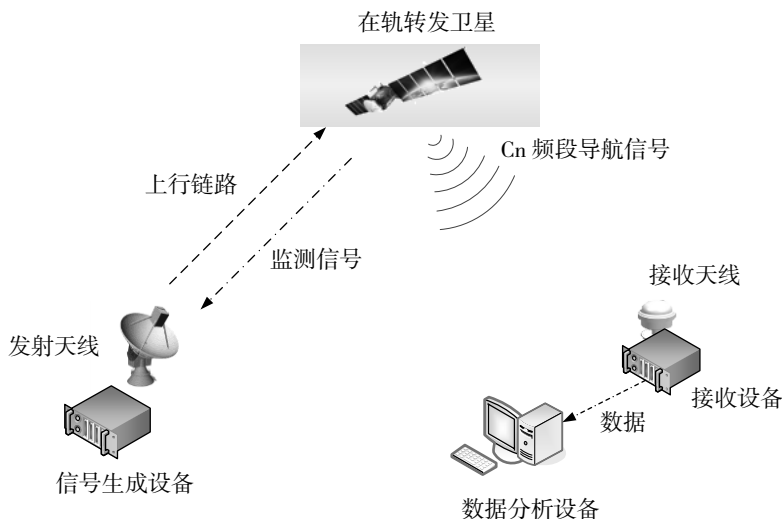


图 7 试验设备与接口关系

在试验过程中,由信号生成设备产生 QPSK(5)-RC(0.25)信号,并通过发射天线经上行链路发射给在轨卫星,经在轨卫星上的转发器转发,发射下行 Cn 频段导航信号。于此同时,地面站的发射天线同时接收 Cn 频段下行导航信号,并进行监测。监测信号正常并稳定后,由地面接收设备通过全向接收天线接收 Cn 频段下行导航信号,并对接收的信号进行捕获和跟踪,输出伪距值。然后将接收测量的伪距值传给数据分析设备,经由数据分析设备进行分析,给出测试结果。图 8 给出了试验过程中的信号生成设备与接收设备。图 9 给出了在试验过程中,不同卫星仰角下的监测信号的频谱图。

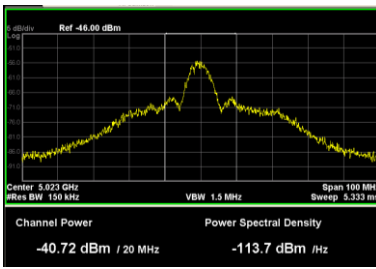


(a) 信号生成设备

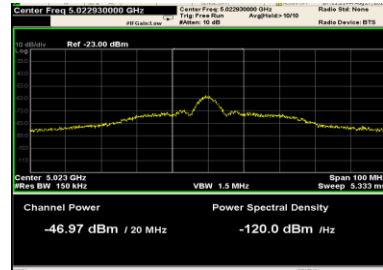


(b) 信号接收设备

图 8 参与试验的信号生成和接收设备



(a) 高仰角监测信号频谱图



(b) 低仰角监测信号频谱图

图 9 高、低仰角监测信号频谱图

3 试验结果分析

考虑接收到的伪距 y_d 满足

$$y_d = \rho + c\delta_r - c\delta_s - T_{iono} - T_{trop} - T_{rel} - T_{bia} + \varepsilon + n, \quad (6)$$

式(6)中, ρ 为真实距离, c 为光速, δ_r 为接收机钟差, δ_s 为卫星钟差, T_{iono} 为电离层引起的误差, T_{trop} 为对流层对应的误差, T_{rel} 为相对论效应引起的偏差, T_{bia} 为接收机测量引起的偏差, ε 为多径、卫星轨道以及其他效应引起的偏差, n 为热噪声。由于电离层误差、对流层误差以及相对论效应引起的偏差在不出现天气剧烈变化以及强电离层风暴情况下变化缓慢,同时接收机引起的偏差以及多径效应、卫星轨道变化等引起的偏差在静态条件下较随机热噪声变化缓慢,接收机和卫星钟差相比于热噪声是按照一定的规律变化的,因此可以利用多项式拟合的方法评估热噪声对信号测距性能的影响。

令 $y_d = \rho + \Delta\rho + n$, 这里 $\Delta\rho$ 表示为

$$\Delta\rho = c\delta_r - c\delta_s - T_{iono} - T_{trop} - T_{rel} - T_{bia} + \varepsilon, \quad (7)$$

则 $\rho + \Delta\rho$ 可以用 n 阶多项式拟合:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n, \quad (8)$$

选择拟合多项式使得公式(9)达到最小

$$E[y_d - y] = E[\rho + \Delta\rho + n - y], \quad (9)$$

式(9)中, E 为求均值操作。由于多项式拟合消除了偏差, 剩余的部分是影响测距性能的抖动, 因此等式(10)反映了整个链路的测距性能。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_d[i] - y)^2}{n-1}}, \quad (10)$$

式(10)中, $y_d[i]$ 是第 i 个接收伪距值。

选择接收机参数为 $\beta = 20$ MHz, $B = 5$ Hz, $\Delta = 200$ ns, $T = 1$ ms, 数据测试时长为 10 min, 在 Cn 频段接收的 QPSK(5)-RC(0.25)信号在不同载噪比条件下的测距性能如图 10 和图 11 所示。

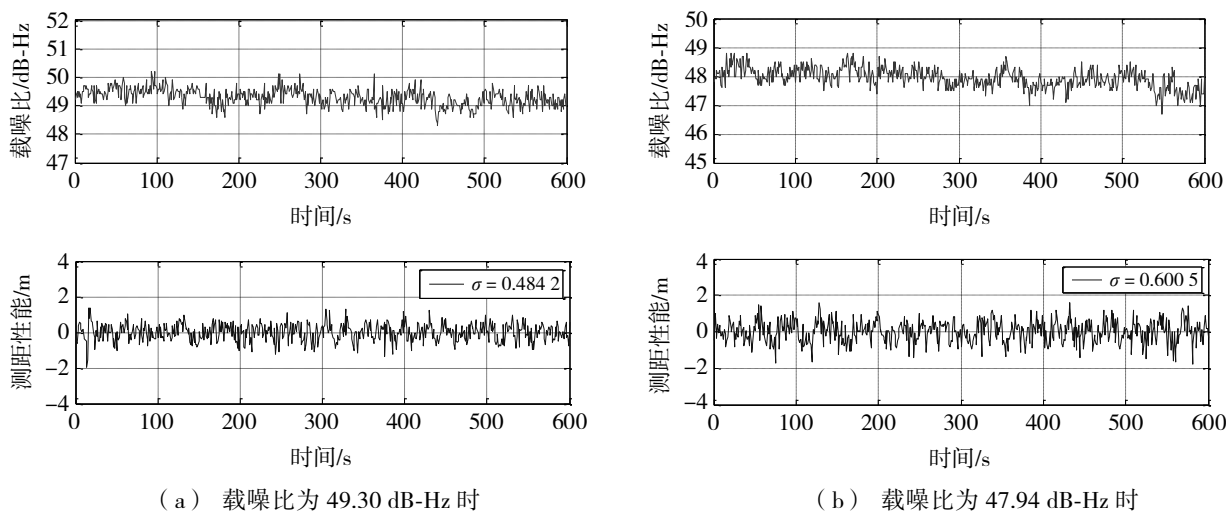


图 10 载噪比为 49.30 dB-Hz 和 47.94 dB-Hz 时 QPSK(5)-RC(0.25)信号测距性能

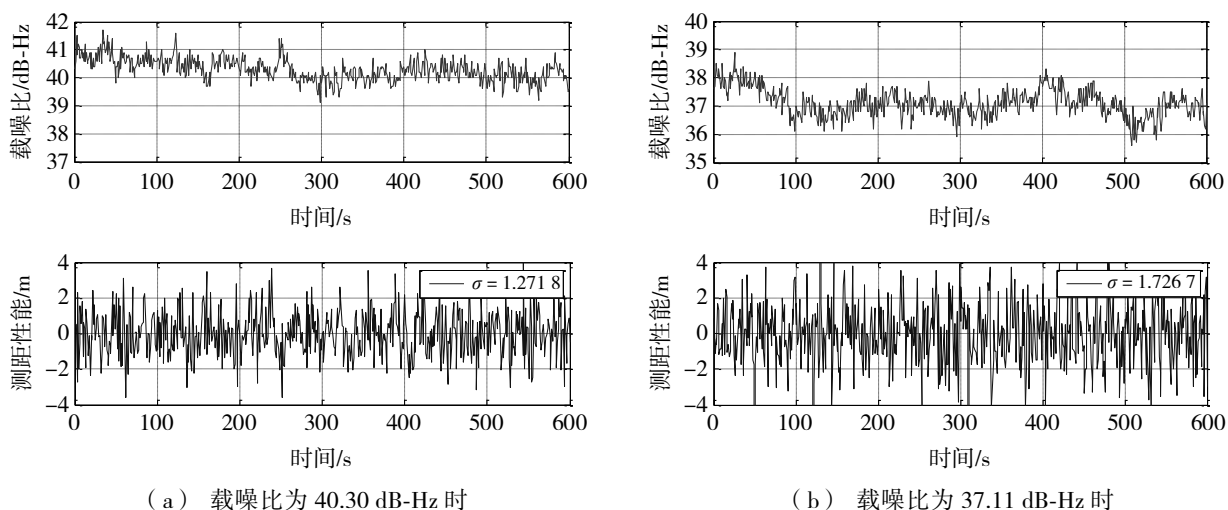


图 11 载噪比为 40.30 dB-Hz 和 37.11 dB-Hz 时 QPSK(5)-RC(0.25)信号测距性能

图 10 和图 11 给出了 QPSK(5)-RC(0.25)信号在不同载噪比条件下的测距性能的测试结果。从测试结

果可以看出,随着载噪比的降低,信号的测距性能也随之下降。表 3 列出了根据公式(5)在环路带宽 $B = 5 \text{ Hz}$, 非相干积分时间 $T = 1 \text{ ms}$, 射频前端带宽 $\beta = 20 \text{ MHz}$, 早迟码相关间隔为 $\Delta = 200 \text{ ns}$, 实测载波噪比条件下计算出的仿真结果以及在同一载噪比条件下的试验测试结果。图 12 根据表 3 的统计结果,画出了相应的测试结果拟合曲线以及仿真结果曲线用于对比分析。根据图 12 可知,在高载噪比条件下,仿真曲线与测试结果拟合曲线有非常一致的趋势,测试结果比仿真结果高约 0.25 m 左右。这是由于在测试过程中,不仅会引入白噪声干扰,还会引入接收机钟差、卫星动态误差以及接收机信道以及多径等干扰,因此实测结果会比理论仿真结果差。但是白噪声作为主要的误差源,仍然对测距性能产生主要的影响,因此仿真曲线与测试结果拟合曲线有非常一致的趋势。在低载噪比条件下,从拟合曲线来看测试结果与仿真结果存在一定的偏差,这一方面是由于缺少更多的测试样点,因为载噪比低于 35 dB-Hz 接收机就很难捕获跟踪到信号,不能提供更低载噪比条件下的样点,对于曲线的拟合有一定的局限性;另一方面,由于低载噪比条件下,白噪声较大,接收机跟踪环路不再是完全的线性区等效模型,这可能会对信号的跟踪造成一定的影响,但是即使在低载噪比条件下,测试结果依然比仿真结果高约 0.2 m 左右,可见这并不影响测距性能的整体趋势,测试结果的整体趋势与仿真结果有着较好的符合度。

表 3 C_n 频段 QPSK(5)-RC(0.25)信号仿真结果与测试结果对比

载噪比/dB-Hz	仿真结果/m	测试结果/m
49.30	0.321 0	0.484 2
47.94	0.377 1	0.600 5
45.25	0.520 8	0.788 0
43.11	0.678 3	0.960 9
40.30	0.975 1	1.271 8
37.11	1.524 5	1.726 7
35.88	1.836 0	2.031 0

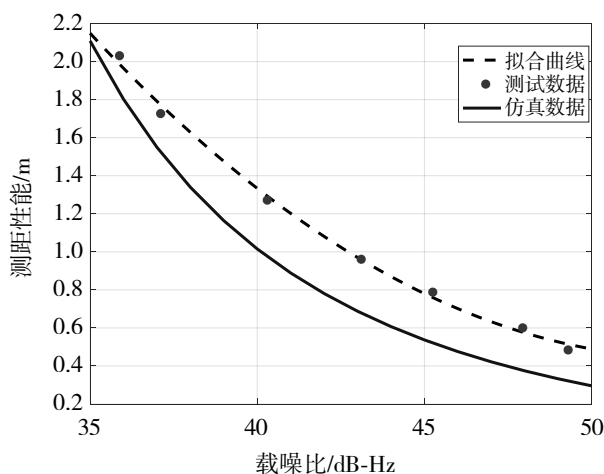


图 12 不同载噪比条件下测距性能的测试结果与仿真结果对比

4 结语

针对 C_n 频段导航带宽受限的特性,本文设计了基于余弦滚降的码片成型信号。仿真结果表明,设

计信号能够有效降低对带外业务的干扰,同时减少了由于滤波器群时延特性不理想而引入的测距偏差。为了在窄相关条件下不对信号测距性能产生严重的恶化,设计的信号选择了滚降系数为 0.25 的成型波形。同时,针对 C_n 频段导航链路的测距性能验证问题开展了试验和测试,基于设计的 C_n 频段导航信号,用转发卫星测试平台,开展了基于星地链路的 C_n 频段卫星导航信号试验,测试了 C_n 频段卫星导航信号的测距性能,提供了利用 C_n 频段开展导航试验的测试数据和测试结果。测试结果表明,信号的测距性能与仿真结果整体趋势一致,作为重要的导航业务频率资源,在 C_n 频段开展导航服务是可行的。

参考文献:

- [1] 李强. 基于阵列天线的 GPS 抗干扰技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [2] SCHWEIKERT R, WOERZ T, GAUDENZI R D, et al. On signal structures for GNSS-2[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2000, 18(4-5): 271-291.
- [3] LINDENTHAL W. Galileo satellite C-band navigation payload space segment assessments[C] // WP 3300, [S.l.]: [s.n], 2001.
- [4] IRSIGLER M, HEIN G W, PEIFFER S A. Use of C-band frequencies for satellite navigation: benefits and drawbacks[J]. GPS Solutions, 2004, 8(3): 119-139.
- [5] IRSIGLER M, GÜNTER W, HEIN G W, et al. Aspects of C-band satellite navigation: signal propagation and satellite signal tracking[C] // Proceedings of the European Navigation Conference, Copenhagen: NEIN, 2002.
- [6] RODRIGUEZ J A, WALLNER S, WON J H, et al. Study on a Galileo signal and service plan for C-band[C] // 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah: ION, 2008: 2515-2529.
- [7] PEIFFER S A, FELBACH D, SOUALLE F, et al. Assessment on the use of C-band for GNSS within the European GNSS evolution programme[C] // 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah: ION, 2008(2): 637-646.
- [8] HEIN G W, RODRIGUEZ J A, WALLNER S, et al. Architecture for a future C-band/L-band GNSS mission-part2: signal considerations and related user terminal aspects[J]. Inside GNSS, 2009: 47-56.
- [9] AI Guo-xiang, MA Li-hua, MA Guan-yi, et al. Achieving centimeter ranging accuracy with triple-frequency signals in C-band satellite navigation systems[J]. Navigation, 2011, 58(1): 59-68.
- [10] THOMAS J, WANG W, FIEBIG U S, et al. Comparison of L- and C-band satellite-to-indoor broadband wave propagation for navigation applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(10): 3899-3909.
- [11] YAN Y J, ZHANG S Y. Rain attenuation analysis of C-band satellite navigation signal[J]. Modern Navigation, 2012(3): 157-159.
- [12] 王瑛, 蒙艳松, 陶晓霞, 等. C_n 频段卫星导航研究[C] // 第七届中国卫星导航学术年会论文集, 长沙: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2016.
- [13] 孙岩博, 薛睿, 王盾, 等. L/C 双频段联合导航信号中通用调制方案研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(4): 778-784.
- [14] 李志芸, 白燕, 卢晓春. C_n 频段导航信号射频兼容评估方法研究[J]. 时间频率学报, 2019, 42(1): 87-95.
- [15] BETZ J W. Design and performance of code tracking for the GPS M code signal[C] // Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City: ION, 2000: 2140-2150.