

# 基于 5G 标准的低轨卫星通信初始同步技术

李乐天, 王赛宇, 王力男

(中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081)

**摘要:** 在低轨卫星通信系统中, 初始同步技术是其至关重要的一步, 而由于低轨卫星信道的大多普勒频偏等原因影响了信号的同步性能, 为了减少影响, 借鉴地面 5G 初始同步算法, 在 PSS 检测中进行本地 PSS 整数频偏处理, 扩大了频率估计范围, 减少了初始同步时间, 其正确检测率比传统算法提高了 1.5 dB; 在小数倍频偏估计中, 采用分段处理的 PSS 差分互相关算法, 其精确度相较于传统算法, 提高了 1~2 dB; 最终通过仿真可知, 该算法可以在高动态、低信噪比环境下完成初始接入过程的同步信号检测, 可以满足低轨卫星通信系统的下行同步要求。

**关键词:** 低轨卫星; 多普勒频偏; 初始同步; PSS 检测; 小数倍频偏估计

## Initial Synchronization Technology of Low Orbit Satellite Communication System Based on 5G Standard

Li Letian, Wang Saiyu, Wang Linan

(Fifty-fourth Research Institute, China Electronics Technology Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** In the low-orbit satellite communication system, the initial synchronization technology is a crucial step, and the signal synchronization performance is affected by the Doppler frequency offset of the low-orbit satellite channel. In order to reduce the impact, the ground 5G initial synchronization algorithm is used for reference, Perform local PSS integer frequency offset processing in PSS detection, expand the frequency estimation range, reduce the initial synchronization time, and its correct detection rate is 1.5dB higher than the traditional algorithm; in the fractional frequency offset estimation, the segmented processing is used Compared with the traditional algorithm, the accuracy of the PSS differential cross-correlation algorithm is improved by 1 to 2dB. Finally, simulation shows that the algorithm can complete the synchronization signal detection of the initial access process in a high dynamic, low signal-to-noise ratio environment, and can meet the downlink synchronization requirements of the low-orbit satellite communication system.

**Keywords:** LEO satellite; Doppler frequency offset; Initial synchronization; PSS detection; Fractional frequency offset estimation

## 0 引言

随着卫星移动通信系统的不断发展, 用户对高传输、广范围、较低时延以及灵活性高的低轨卫星移动通信系统的需求逐渐增长; 相比地面移动通信系统, 低轨卫星移动通信系统覆盖范围更加广泛, 多颗低轨卫星能实现全球无缝覆盖。但低轨卫星移动通信系统因为卫星的高速运动带来覆盖区的快速变化导致地面移动终端和卫星之间产生非常大的多普勒频移从而严重影响其同步性能。3GPP 组织从 R14 开始星地融合的研究工作, 并且在 TS22.261 中对卫星相关的接入网协议及架构进行评估, 并进一步开展基于 5G 标准的低轨卫星接入研究。现在 5G NR 标准规定了下行 OFDM 信号的子载波间隔不只是固定的 15 kHz, 还有 30、60、120 和 240 kHz 共 4 种子载波间隔可以选择。5G 的无线帧和子帧的长度与 4G LTE 一样分别为 10 ms 和 1 ms。除此 5G 中 PSS 和 SSS、PBCH 一起组成 SSB 块 (SS Block), 在频域上占用连续的 240 个子载波带宽, 在时域上

占用 4 个连续的 OFDM 符号。在 5G 中 SSB 的时域和频域位置不固定, 并且在 5 ms 半帧周期内不同的子载波间隔帧结构可能有多个 SSB, 用来满足终端的快速捕捉。

国内外 5G 低轨卫星的研发仍处于起始阶段, 我国的国家卫星互联网系统的空口基本技术标准是基于地面 5G 的技术标准<sup>[1-2]</sup>, 其中的产品终端所应用的初始同步技术需要满足高动态大多普勒的低轨卫星信道特点<sup>[3]</sup>, 所以研究基于 5G 的低轨卫星的初始同步技术是当前技术体制中一个关键技术点。

## 1 下行初始同步过程

当设备刚启动, 信号的起始位置还无法确定, 物理层会自动进行时间/频率同步过程, 然后通过建立的物理信道, 使得信号得到 OFDM 符号同步和帧同步, 并得到设备接入的小区 ID, 这就是初始同步的过程, 即小区搜索<sup>[4]</sup>。下行初始定时/频率同步的处理基本分 4 步<sup>[5]</sup>: PSS (主同步信号) 检测、整数倍频偏估计、小数倍频偏估计和 SSS

收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2020-12-15。

作者简介: 李乐天(1994-), 男, 河北省定州市人, 硕士研究生, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

引用格式: 李乐天, 王赛宇, 王力男. 基于 5G 标准的低轨卫星通信初始同步技术[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 150-154.

(从同步信号) 检测。下行初始定时/频率同步方案如图 1 所示(本文对初始同步中的 PSS 检测和小数倍频偏估计这两部分进行研究)。

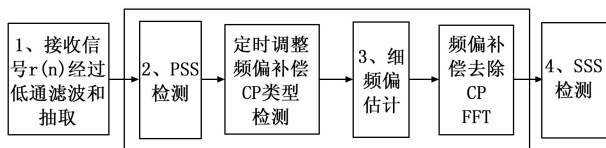


图 1 下行初始同步框图

1) 终端将接收信号通过低通滤波器进行处理;

2) 在时域上对本地 PSS 和接收端 PSS 做互相关检测取得定时同步, 同时获得小区组内 ID ( $N_{id}^{(2)}$ ) 和信号的整数倍频偏;

3) 得到 PSS 信号定时同步位置后, 利用接收端接收的 PSS 与本地 PSS 信号进行差分互相关运算, 获得信号的小数倍频偏。(因为本文采用了 OFDM 的基带调制, 所以通信系统会对频率偏移比较敏感, 从而降低了系统的同步性能, 因此需要通过频偏估计对信号进行补偿。);

4) 根据 5G-NR 标准规定里, PSS 在信号时域上的位置与 SSS 的位置之间的关系, 可以对 SSS 进行定位, 然后对本地 SSS 与接收端接收的 SSS 在频域上做互相关检测, 可以获得频域同步与小区组 ID ( $N_{id}^{(1)}$ ), 进而得到完整的小区 ID。

## 2 PSS 检测

通过 PSS 检测可以得到符号起始位置, 位置处在循环前缀的范围 (CP, Cyclic Prefix) 内, 即符合 5G-NR 标准规定的下行同步要求。在文献[6]中描述了一种本地 PSS 与接收端接收的 PSS 进行时域上滑动互相关的定时同步算法, 通过互相关得到的相关峰值来确定小区组内 ID ( $N_{id}^{(2)}$ ) 及其所对应的点来明确定时位置。此算法的计算复杂度较小, 然而算法会叠加积累频偏使算法的相关峰值受到影响, 导致算法的抗频偏性较差。文献[7]对上述算法进行改进: 通过将本地 PSS 序列和接收端接收的 PSS 序列进行平均分段处理, 再对各段依次求互相关值的平方来确定定时度量函数。而文献[8-9]中提出了将本地 PSS 序列和接收端接收的 PSS 序列均进行时域上差分处理后, 再对两个 PSS 序列进行互相关运算, 得到相关峰值所对应的点就是定时同步位置。改进后算法能够降低因积累了多个频偏而受到的影响, 即算法可以适应较大的频偏范围。上述算法是利用了本地 PSS 进行互相关来得到符号定时位置, 而在文献[10-12]中提出了利用接收端接收的 PSS 自相关的算法, 5G 低轨卫星同步可以借鉴 S&C 算法思想, 利用搜索周期内多个 SSB 块内的 PSS 自相关运算, 通过相关峰值对应点推算出定时同步位置。该算法虽然构造简单, 但是 CP 与其对应的接收端接收的信号之间联系会引发平台效应, 从而影响算法对 PSS 检测的准确性。为了减少平台效应, 文献

[13]中均将相关运算起始点前后移动不超过 CP 长度的距离, 进行 CP 长度的相关运算后再取平均值, 其最大值对应的点为定时同步的位置。

从 PSS 检测的精确度与复杂度这两个方面考虑, 定时同步算法选用在时域上进行本地 PSS 与接收端 PSS 互相关检测, 如果 PSS 检测在频域进行, 增加了不必要的 FFT/IFFT 运算。

本文的算法是根据加入不同倍数的整数倍频偏对本地 PSS 进行分组, 并对每组与接收端接收的 PSS 进行互相关运算, 通过找到每个组对应的相关峰值中最大峰值所对应的点, 来得到信号的符号定时同步位置, 最大相关峰值所在组表明了信号的整数倍频偏。最终算法除了完成 PSS 检测外, 还可以得到整数倍频率估计, 具体算法原理如下所示:

5G-NR 标准规定, PSS 包含在 SS/PBCH 块 (以下简称 SSB 块) 中, 在 5G-NR 信号 20 ms 的发送周期中, 只有前 5 ms 的同步突发集含有多个 SSB 块 (即含有多个 PSS 序列)。5G 的 PSS 在时域上占据 SSB 块中时域上第 1 个 OFDM 符号; 在频域上, 5G PSS 是由 127 个中心子载波和处于信号两端未使用, 起分割保护作用的子载波共同构成 240 个子载波。PSS 频域产生格式<sup>[14]</sup>为:

$$d_{pss}(n) = 1 - 2x(m), m = (n + 43i_p^{(2)}) \bmod 127, 0 \leq n < 127 \quad (1)$$

其中:  $x(i+7) = (x(i+4) + x(i)) \bmod 2, [x(6) x(5) x(4) x(3) x(2) x(1) x(0)] = [1 1 1 0 1 1 0]$ 。由于 PSS 所在 OFDM 符号的采样点数为 256, 所以本地 PSS 的  $M$  序列通过 ifco 参数取值  $[-2, 2]$  循环移位后进行 IFFT 变换产生长度为  $L=256$  样点的本地时域序列  $P_{id,x,icfo}(n)$ 。

在信号系统带宽未知的情况下, 接收端对接收信号  $r(t)$  在时域上采样, 接着对采样信号进行降采样处理 (减少计算复杂度), 再将降采样后的离散信号  $r(n)$  进行滤波, 得到接收端 PSS 离散时域信号为  $\tilde{r}(n)$ , 最后将它与本地 PSS 信号  $p_{id,x,icfo}(n)$ , 进行滑动相关运算。假设接收离散时域信号为:

$$\tilde{r}(n) = e^{-j(2m\epsilon_0/N)} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} h_l(n) s(n - \tau_l - \tau_d) + v(n) \quad (2)$$

$h_l(n)$  表示信道多径增益,  $L$  表示多径的路数,  $\tau_l$  表示多径延时,  $\tau_d$  表示发射接收时延,  $v(n)$  表示均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声,  $\epsilon_0$  表示接收信号相对于发送信号的归一化频偏,  $N$  表示 IFFT/FFT 的点数。

本文中改进的 PSS 检测算法的原理: 利用 PSS 序列的时频特性 (恒幅、零自相关), 在本地生成 5 组带有整数倍频偏 (因为本方案中整数倍频偏范围是  $[-2, 2]$ , 所以每组的本地 PSS 都附加上从  $-2$  到  $2$  之中一个整数为倍数的整数倍频偏) 的 PSS 时域序列组, 每组包含 3 个不同索引号的 PSS 序列, 将所有这些 PSS 序列分别与接收到的信号进行滑动互相关, 估算 PSS 的起始位置, 并且判断最大的相

关峰值所对应的本地 PSS 索引号，得到小区组内 ID ( $N_{ID}^{(2)}$ )。根据上述的 PSS 检测原理来定义定时度量函数，表达式如下：

$$T_{(idx, icfo, d)} = \left| \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=0}^{L-1} |\tilde{r}(n+d)|^2}} \sum_{n=0}^{L-1} \tilde{r}(n+d) \cdot p_{idx, icfo}^*(n) \right|^2 \quad (3)$$

其中： $\tilde{r}(n)$  为接收信号； $p_{idx, icfo}(n)$  为本地 PSS 序列，5G-NR 中规定的 PSS 序列为 3 个，由于低轨卫星移动通信具有较大多普勒频移，计算表明对于 L 波段下行多普勒频移范围可达 -35~35 kHz 之间，而 5G-NR 规定的最小子载波间隔为 15 kHz，最高为 240 kHz，这意味着整数倍频偏取值为 -2~+2 之间；本地 3 种 PSS 序列加各自 5 种可能的整数倍频偏，故  $P_{idx, icfo}(n)$  有 15 个候选值；式中  $idx$  为小区组内 ID ( $N_{ID}^{(2)}$ )， $icfo$  为整数倍频偏值，L 表示一个子帧内 PSS 的采样点长度。

通过接收序列与 5 组，总共 15 个本地 PSS 进行滑动互相关运算，当最大相关峰值大于预设判决门限时，得到最大的相关峰值所对应的  $d$  作为接收到的时域信号中半帧的定时点，判断相关峰值最大的本地 PSS 所对应的小区组内 ID 和整数倍频偏，即 PSS 检测同时完成了定时同步、检测小区组内 ID 和整数倍频偏估计。

### 3 小数倍频偏估计

5G-NR 规定了同步信号是基于 OFDM 调制，即信号里子载波具有敏感的正交性，进而接收信号要保持严格的正交性，最终接收端能正确解调信号含有的数据。由于低轨卫星系统的高移速特点，信号在卫星信道传输中会伴有大多普勒频偏。如果接收信号的频偏大小是子载波间隔的整数倍，接收信号的各个子载波虽然会发生循环移位，但是子载波之间还是处于正交，继而在解调接收信号时，数据会发生循环移位。因为在 PSS 检测这一节已经估计出整数倍频偏，所以下面介绍估计小数倍频的算法。小数倍频偏（频偏大小是子载波间隔的小数倍）会破坏接收信号中各个子载波的正交性。所以，接收信号需要通过进行相关运算，得出其相位偏移，再根据相位偏移来求频率偏移。

在文献[15]中首次提出了基于 CP 自相关的频偏估计算法，该算法利用 OFDM 符号中 CP 与其符号对应的数据的关系进行相关运算。基于 CP 自相关的算法复杂度比较低，能够快速估计出频偏大小，然而 CP 符号长度较短，估计出的小数倍频偏的精度较低<sup>[16]</sup>。因此文献[17-20]中提出一种改进算法：利用 5G 的 SSB 的格式，可以将连续的多个 OFDM 符号的 CP 进行联合相关处理，最终求出多个 CP 的频偏值的平均值为小数倍频偏估计。

上述算法均是利用同步信号的 CP 自相关进行频偏估计，下面根据文献[21-22]中利用差分方法处理本地 PSS 序列与接收端接收的 PSS 序列的思想，对算法进行改进：

将时域上的本地 PSS 与接收端接收的 PSS 逐点共轭相乘后，讲其平均分成两段并且对前后两段进行相关运算。虽然增加了算法的复杂度，但是提高了频偏估计算法的准确性，算法具体的原理如下所示：在补偿完 PSS 定时偏移的条件下，在时域上使用本地 PSS 序列  $s_{PSS}(n)$  共轭点乘接收端接收的 PSS 符号  $r_{PSS,i}(n)$  得到  $y(n)$  ( $y(n)$  的表达式如式 (4) 所示)，去掉序列信息；然后平均分成前后两段，两部分分别求和，再对前后两段共轭相乘，最后估计频偏大小。

$$\begin{aligned} y(n) &= s_{PSS}^*(n) r_{PSS,i}(n) = \\ & s_{PSS}^*(n) [e^{j(2\pi\epsilon_n/N)} e^{j(2\pi\epsilon_n m(N+N_g)/N)} \cdot \\ & \sum_{l=0}^{L-1} h_l(n) s_{PSS}(n-\tau_l) + v(n)] = \\ & e^{j(2\pi\epsilon_n/N)} e^{j(2\pi\epsilon_n(N+N_g)/N)} h_i s_{PSS}^*(n) s_{PSS}(n-\tau_i) + \\ & e^{j(2\pi\epsilon_n/N)} e^{j(2\pi\epsilon_n(N+N_g)/N)} \cdot \\ & \sum_{l \neq i, l=0}^{L-1} h_l(n) s_{PSS}^*(n) s_{PSS}(n-\tau_l) + s_{PSS}^*(n) v(n) = \\ & e^{j(2\pi\epsilon_n/N)} e^{j(2\pi\epsilon_n m(N+N_g)/N)} h_i E(n) + I(n) + \tilde{v}(n) \\ & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ C_i &= \sum_{n=0}^{N/2-1} y^*(n) y(n + \frac{N}{2}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中： $r_{PSS,i}(n)$  为第  $i$  根天线接收到的 PSS 序列， $s_{PSS}(n)$  为本地生成的 PSS 序列， $E(n)$  表示 PSS 的能量， $I(n)$  表示产生的干扰项， $\tilde{v}(n)$  表示噪声项，N 为 OFDM 符号 FFT 采样点长度， $N_g$  表示循环前缀的长度。如果接收端有 2 根天线，相关运算结果合并为  $C = C_1 + C_2$ ，同时可以对多个 PSS 信号联合估计  $C_{acc} = \sum_l C^{(l)}$ ，由此计算归一化小数倍频偏为：

$$\epsilon_f = \frac{1}{\pi} \text{angle}(C_{acc}) \quad (6)$$

而且本文仿真借鉴文献[23-24]中对本地 PSS 序列与接收端接收的 PSS 序列进行分段处理的思想，提出了一种改进方法，将分段后的两段差分序列再次分段，这四段差分序列任取其两段做相关运算，重复进行上面的步骤得到 6 个频偏估计值，最后对得到的 6 个估计值求取期望，过程如下式所示：

$$\begin{aligned} P(p, q) &= \sum_{k=0}^{N/4-1} y^*(k + p \frac{N}{4}) y(k + q \frac{N}{4}) \\ p &< q \& p, q \in \{0, 1, 2, 3\} \\ \hat{\epsilon}_{PSS}(p, q) &= \frac{\text{angle}(P(p, q))}{(p - q)\pi/2} \\ p &< q \& p, q \in \{0, 1, 2, 3\} \\ \hat{\epsilon}_{PSS} &= \frac{1}{6} \sum_{p=0}^3 \sum_{q=0, q < p}^3 \hat{\epsilon}_{PSS}(p, q) \end{aligned} \quad (7)$$

虽然改进算法增加了算法的复杂度，但是算法受到多径效应的影响减少，估计出小数倍频偏的精确程度提高。

### 4 仿真结果与分析

文章前两节描述几种卫星 5G 定时同步和频偏估计算法，下面通过 Matlab 先模拟出卫星信道环境，再在该环境

下对改进算法与经典算法进行仿真。对比仿真结果得到文章中改进的定时同步/频偏估计算法可以适用于低轨卫星移动通信系统。仿真的参数如表 1 所示。

#### 4.1 卫星信道下 PSS 检测仿真结果及分析

本小节在卫星信道环境下, 对基于 PSS 自相关、互相关定时同步算法以及改进的基于 PSS 互相关的定时同步算法, 这 3 种算法的 PSS 检测正确检测概率的仿真结果进行对比, 证明改进的算法能够在卫星环境下使用。仿真参数如表 1 所示。

表 1 5G 低轨卫星初始同步仿真参数表

参数设置	参数值
载波载频/GHz	2.3
子载波间隔/kHz	15
子载波数	4096
每子帧符号数	14
调制方式	QPSK
信道类型	AWGN
卫星切向速度/(km/s)	7.361
卫星轨道高度/km	600
数据占用的资源块数/RB	20
Tx/Rx 天线数	1×1
小区 ID	16
UE 移动速度/(km/h)	70

如图 2 所示, 仿真在卫星信道下得到 3 种算法的 PSS 检测性能。仿真结果显示了频偏为 40 kHz 时, 改进算法的性能比基于 PSS 互相关性能有提升, 平均大约提升 1.5 dB。而基于 PSS 的自相关算法的定时同步性能最差, 在低信噪比的环境尤为明显。因此在卫星信道环境下, 改进算法虽然因为添加整数倍频偏而使计算量变得复杂, 但是算法的 PSS 检测性能有所提升, 所以改进算法可以应用在卫星信道环境中。

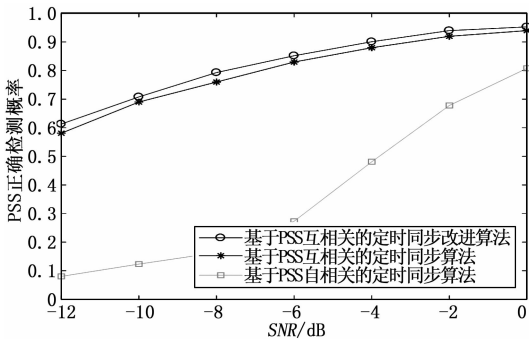


图 2 卫星信道下 PSS 检测性能

#### 4.2 卫星信道下小数倍频偏估计仿真结果及分析

仿真是在模拟卫星信道环境下进行的, 并且频偏设置在 40 kHz, 得出 3 种频偏估计算法的性能。仿真结果表明, 经过分段处理后基于 PSS 差分互相关的频偏估计算法的性能在卫星信道环境下, 是 3 种算法中最优的, RMSE 值要

优于基于 PSS 的差分互相关算法大约 1 dB, 优于基于 CP 的自相关算法大约 2 dB。虽然分段处理使得算法增加运算量, 但是算法可以抵抗来自卫星信道环境下的多径效应, 使得算法的频偏估计性能得到提升。

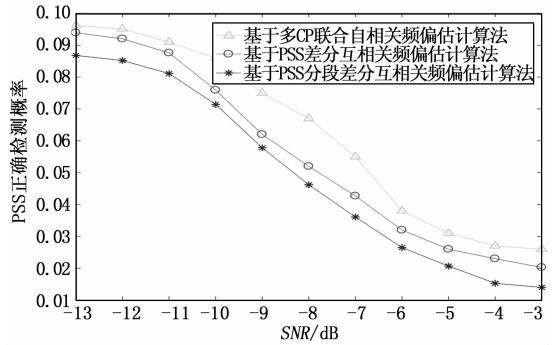


图 3 卫星信道下频偏估计性能

结合图 3 所示的仿真结果得到, 进行分段处理后基于 PSS 互相关的频偏估计算法性能最佳, 该算法在低信噪比时性能较好, 在高信噪比下也不差, 所以在 5G 卫星移动通信系统中, 可以采用基于 PSS 分段互相关算法进行频偏估计。

因为基于 PSS 互相关频偏估计算法是基于 PSS 分段互相关的频偏估计算法的特殊情况, 可以推测对 PSS 序列进行分段次数越多, 算法频偏估计性能越好。所以下面在卫星信道环境且频偏设为 40 kHz 的条件下, 增加分段数目, 进行对算法的频偏估计性能的 Matlab 仿真, 结果如图 4 所示。

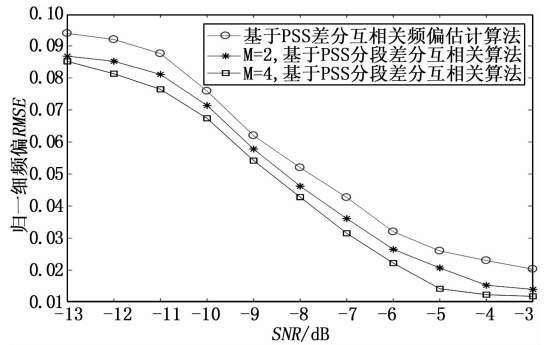


图 4 分段参数值 (M) 不同时, 基于 PSS 的分段互相关算法频偏估计性能

图 4 说明了对于基于 PSS 的互相关频偏估计算法, 分段数的增加, 算法频偏估计的性能提升。但是由于算法的复杂度也随之提高, 不能一味地增加算法的分段数来提高精精度, 避免不必要的浪费。在卫星信道的多径效应不是很明显的时候, 可以适当减少对信号的分段数, 使其运算速度增加。

## 5 结束语

综合仿真结果可以得出, PSS 检测和小数倍频偏估计

使用的改进算法相比于传统算法,均以增加算法的复杂度来提升算法的准确度,同时也表明了在高动态、低信噪比环境下改进算法能完成初始接入过程的同步信号检测,可以满足低轨卫星通信系统的下行链路的同步要求。虽然算法要求至少接收到一帧数据,5G-NR 标准规定 1 帧数据持续时间为 10 ms,对于可能的 8 kHz/s 的多普勒频移变化率来说,每帧数据的频移变化为 80 Hz,只需在相邻帧不断检测这种变化,即可解决频偏高速变化的问题。仿真所用的载波载频为 2.3 GHz,其数值比较低,当载频上升到高频段后,上述算法不一定适用,因此可以再针对高频段的载波下,对基于 5G 标准的低轨卫星通信系统初始同步技术做相关研究。

#### 参考文献:

- [1] 胡昌军,潘峰,缪新育,等. 5G 同步分析及应对措施探讨 [J]. 信息通信技术与政策, 2018 (9): 46-49.
- [2] 宋成勇,刘松,李敬能,等. 5G 时代卫星通信新发展 [J]. 数字通信世界, 2019 (8): 36-37.
- [3] 石洋. 关于 5G 传输同步技术的思考 [J]. 通讯世界, 2019 (9): 101-102.
- [4] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 38.213 (V15.0.0) 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; NR; physical layer procedures for control [S]. 3GPP Organizational Partners, 2017.
- [5] 张建国,黄正彬,周鹏云. 5G NR 下行同步过程研究 [J]. 邮电设计技术, 2019 (3): 22-26.
- [6] 林丹丹. 5G 中上下行同步技术的研究与仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [7] 郭秋阳. 5G 下行信号的同步与检测技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [8] 孙倩楠,张治中. 5G 系统小区搜索 PSS 定时同步方法 [J]. 电讯技术, 2020, 60 (6): 678-683.
- [9] 西安友为兴盛网络科技有限公司. 低轨星座 LTE 空口协议方案设计报告 [R]. 西安: 西安友为兴盛网络科技有限公司, 2019.
- [10] 张树娟. 卫星移动通信系统 OFDM 同步技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [11] 王娜娜. 基于 5G 的低轨宽带卫星移动通信系统同步技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [12] 毛兴. 卫星 OFDM 系统的同步与接入技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [13] 全玉山. 5G 融合低轨卫星移动通信系统时频同步技术 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [14] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 38.211 (V15.0.0) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation (Release 15) [S]. 3GPP Organizational Partners, 2017.
- [15] van de Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of timing and frequency offset in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1997, 45 (7): 1800-1805.
- [16] 张思思. 5G 系统中的小区发现及同步关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [17] 漆飞,胡捍英,周游. LTE 系统中一种改进的基于 CP 的 ML 频偏估计算法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (20): 223-228.
- [18] Guo W, Hu S, Li S. Cyclic prefix-based time and frequency synchronization for TD-LTE downlink transmission [A]. Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP) [C]. Hefei, 2014.
- [19] 李耀晨,赵渊,裴文端. 5G 低轨卫星移动通信系统多普勒频偏估计算法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 226-234.
- [20] 田滔. 低轨卫星移动通信技术定位与下行同步技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [21] 张德民,李秀,陈嘉田. 5G 系统主同步信号定时同步算法的研究 [J]. 光通信研究, 2019 (3): 59-64.
- [22] 王晗. 低轨卫星通信中的 LTE 下行同步 FPGA 设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 30-31.
- [23] 于萌萌. 宽带卫星通信系统 OFDM 同步技术的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [24] 周薇. 5G 低轨卫星移动通信系统下行同步技术研究 [J]. 信息通信, 2020 (9): 4-6.
- [6] Lee G, Chwa D. Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance [J]. Intelligent Service Robotics, 2018, 11 (1): 127-138.
- [7] 张子迎,张汝波,刘心. 多机器人混合编队控制 [J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31 (6): 38-41.
- [8] 赵志刚,林玉娇,尹兆远. 基于自适应惯性权重的均值粒子群优化算法 [J]. 计算机工程与科学, 2016, 38 (3): 501-506.
- [9] Dong X, Yu B, Shi Z, et al. Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications [J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2015, 23 (1): 340-348.
- [10] Qiu H X. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32 (10): 1298-1302.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks [C]. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002: 1942-1948.
- [12] 黄友锐. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [13] 唐贤伦,刘念慈,邓露,等. 基于 MAPSO 的混合式多机器人编队控制 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (7): 104-107.